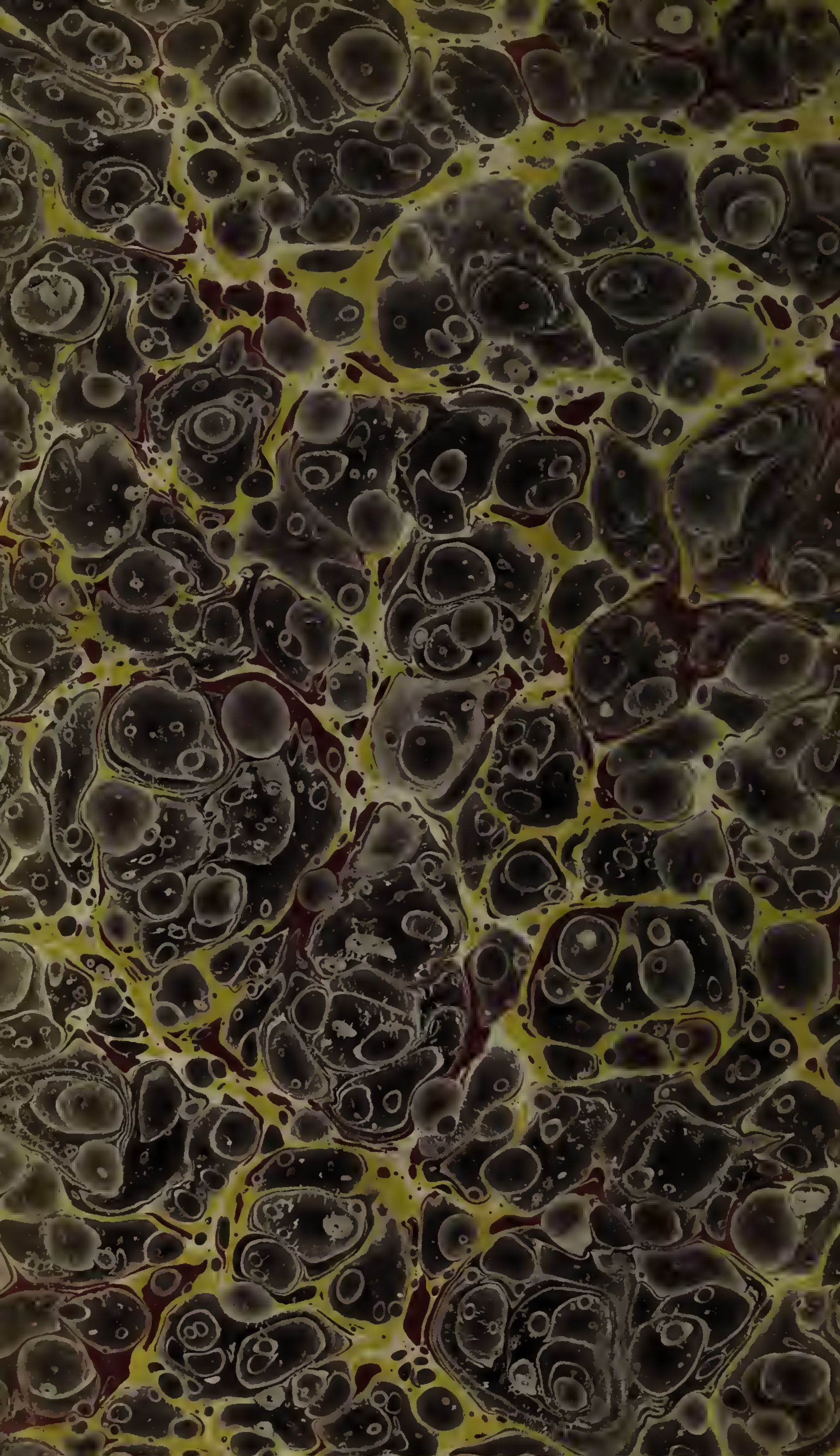
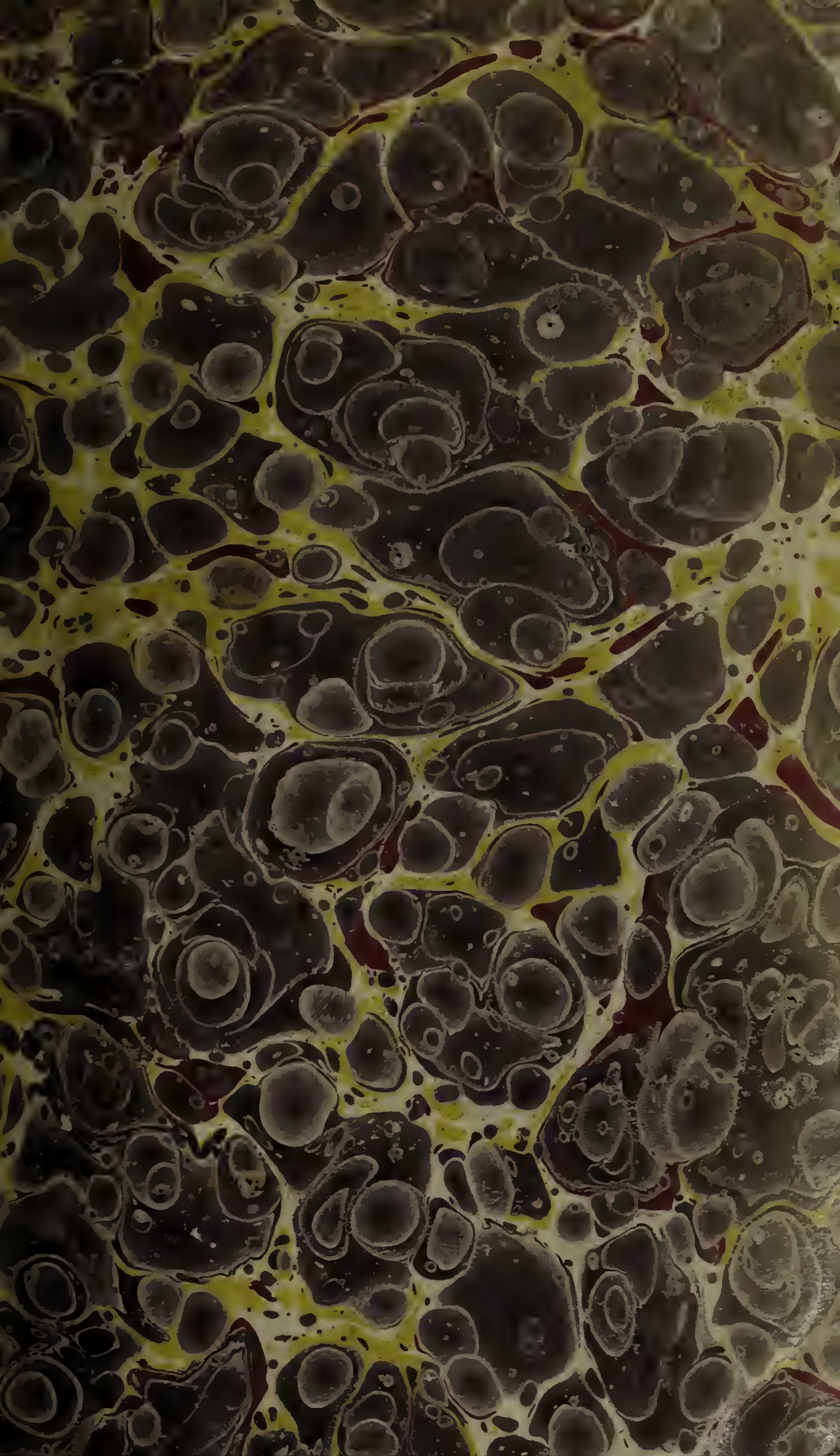






POUILLET, C S. M.
C

# ÉLÉMENS

# DE PHYSIQUE

## EXPÉRIMENTALE

ET

# DE MÉTÉOROLOGIE.

## TOME I.

PREMIÈRE PARTIE.

SE TROUVE AUSSI CHEZ LES LIBRAIRES CI-APRÈS :

A BRUXELLES, chez M. TIRCHER ;
A GAND, chez M. DUJARDIN ;
A LIÉGE, chez M. DESOER ;
A MONS, chez M. LEROUX.

PARIS. — IMPRIMERIE DE COSSON,
RUE SAINT-GERMAIN-DES-PRÉS, N° 9.

# ÉLÉMENS

DE

# PHYSIQUE

EXPÉRIMENTALE

ET DE

# MÉTÉOROLOGIE,

PAR M. POUILLET,

Professeur de Physique à la Faculté des Sciences et à l'École Polytechnique; Membre de la Société philomatique, du Conseil de la Société d'Encouragement, etc.

OUVRAGE ADOPTÉ PAR LE CONSEIL ROYAL DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE POUR L'ENSEIGNEMENT DANS LES ÉTABLISSEMENS DE L'UNIVERSITÉ.

SECONDE ÉDITION, REVUE, CORRIGÉE ET AUGMENTÉE.

---

*Verus experientiæ ordo primo lumen accendit, deinde per lumen iter demonstrat.*

BACON, *Nov. Org.*

TOME PREMIER.

PREMIÈRE PARTIE.

A PARIS,

CHEZ BÉCHET JEUNE,

LIBRAIRE DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE,

PLACE DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE, N° 4.

1832.

WELLCOME
LIBRARY
INSTITUTE

# AVERTISSEMENT

### SUR LA PREMIÈRE ÉDITION.

Les leçons que nous donnons à la Faculté des Sciences, M. Gay-Lussac et moi, s'adressent à un grand concours d'auditeurs. Il n'y a jamais eu en France et il n'y a nulle part en Europe une chaire publique qui, par son institution, puisse servir d'une manière plus efficace à répandre dans la jeunesse les connaissances de la philosophie naturelle. L'Université prend un soin particulier d'étendre notre cabinet de physique et d'augmenter nos collections d'instrumens. C'est par ces moyens que nous pouvons, dans le cours d'une année, embrasser toutes les branches de la science et faire toutes les expériences fondamentales qui se rapportent à chacune d'elles. Les plus longs développemens ne suppléeraient pas à la seule inspection des appareils et des phénomènes qu'ils peuvent produire; c'est surtout en physique qu'il faut voir et toucher : quand les yeux sont frappés par l'expérience, le raisonnement

a plus de prise pour frapper l'intelligence. Cependant, nos paroles sont comptées par le temps, nos déductions doivent être courtes et rapides; et c'est, pour ainsi dire, d'un seul trait que nous devons faire passer l'esprit, de la contemplation des faits les plus simples à la conception des idées les plus générales. Celui qui écoute saisit au premier instant; il aperçoit, suivant le degré d'attention qu'il y porte, tantôt une faible lueur, tantôt une vive lumière; mais bientôt les traces de la vérité se perdent ou se confondent. C'est à peu près comme un vaste paysage dont on voit l'arrangement et l'ensemble; si l'on passe rapidement ou si la vue se tourne vers un autre point de l'horizon, il est à craindre qu'une seconde image ne trouble ou n'efface la première. Un simple dessin, une rapide esquisse suffit à l'esprit attentif pour réveiller ses souvenirs et rétablir l'ordre dont il avait été frappé.

Ces Élémens de Physique et de Météorologie sont à peu près le texte de mes leçons, et cependant ils n'en peuvent être qu'une esquisse. A plus forte raison ne peuvent-ils être qu'une imparfaite ébauche des leçons de M. Gay-Lussac, malgré tous les efforts que j'ai dû faire pour me rapprocher le plus possible de son plan et de sa méthode. Une foule de détails, de descriptions et de rapprochemens doivent être supprimés dans un livre, à moins de redoubler les longueurs et les embarras de style au milieu des-

quels la vérité a déjà tant de peine à percer. Les difficultés qui se présentent, pour composer un ouvrage élémentaire de physique, sont sans nombre; on en a trop de preuves, et sans doute elles m'auraient retenu si le zèle des auditeurs de la Faculté et l'empressement avec lequel ils accueillent mes leçons ne m'eussent fait un devoir de tenter un nouvel effort pour leur être utile : puisque ma vie est consacrée à la science et à l'enseignement, il faut bien accomplir ma tâche avec tout le soin et tout le dévouement dont je suis capable.

---

# AVERTISSEMENT

## SUR LA DEUXIÈME ÉDITION.

---

Il y a à peine huit mois que le dernier volume de la première édition est publié, et déjà le besoin d'une nouvelle édition se fait sentir. Cet accueil plein de bienveillance avec lequel on a reçu mon ouvrage m'imposait l'obligation de redoubler de soins et d'efforts pour offrir au public une deuxième édition qui représentât d'une manière simple et fidèle l'état actuel de la science.

Le plan général n'a éprouvé aucun changement : les nouvelles découvertes sont venues se classer d'elles-mêmes dans les divisions principales que j'avais adoptées pour la première édition. La méthode logique et expérimentale à laquelle je m'étais particulièrement attaché pour exposer dans leur ensemble tous les phénomènes et toutes les lois générales de la physique, a été accueillie avec trop d'indulgence pour qu'il me fût permis de la modifier. S'il est vrai que cette méthode, débarrassée des considérations et des formules mathématiques, rende la science accessible à tous les esprits, il est certain qu'elle fera

naître des observateurs et par conséquent des découvertes; car c'est par les recherches expérimentales que l'on découvre des faits nouveaux et non pas par les spéculations mathématiques.

Cette deuxième édition ne diffère donc de la première que par des corrections assez nombreuses et par d'importantes additions. J'indiquerai ici, comme ayant un haut degré d'intérêt et d'utilité, les savantes recherches de MM. Arago et Dulong sur la loi de Mariotte et sur la force élastique de la vapeur d'eau. Ces recherches, entreprises sur l'invitation de l'Académie des sciences, s'étendent jusqu'à des températures qui dépassent tous les besoins actuels de l'industrie, et il est probable que le génie de la mécanique dans ses plus hardies conceptions ne pourra jamais atteindre ces limites pour des machines usuelles.

Plusieurs savans météorologistes m'ayant témoigné le désir qu'ils auraient de trouver dans les Élémens de Météorologie qui terminent le quatrième volume le résultat des principales observations relatives au magnétisme terrestre, je me suis fait un devoir de consacrer un chapitre à ce vaste sujet. On y trouvera la belle carte de l'équateur magnétique construite par le capitaine Duperrey d'après ses observations, celles de M. De Blosseville et celles du capitaine Sabine. Je regrette vivement de n'avoir pas pu resserrer dans d'assez étroites limites la discussion des intensités magnétiques et celle de toutes les

inclinaisons connues jusqu'à ce jour, pour indiquer la trace actuelle des lignes sans inclinaison et le lieu probable des pôles magnétiques; mais j'ai du moins essayé de rapporter, avec quelques détails, tout ce que l'on sait maintenant de plus précis sur le phénomène des aurores boréales.

15, quai Voltaire, 14 juillet 1831.

---

# ÉLÉMENS
# DE PHYSIQUE
## EXPÉRIMENTALE
## ET
# DE MÉTÉOROLOGIE.

---

## NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

---

### CHAPITRE PREMIER.

*Des Phénomènes naturels. — De l'Espace. — Du Temps. — De la Matière. — Des Forces. — Du Mouvement. — De l'inertie.*

1. Les phénomènes naturels qui se produisent sur la terre, et ceux qui paraissent dans le ciel, nous offrent de vastes sujets de méditation : on les regarde, on les contemple, et l'on cherche à démêler dans leurs apparences variées des propriétés communes ou des vérités générales. Le désir de pénétrer dans un sujet si merveilleux nous emporte malgré nous; soyons libres un moment des soins et des distractions de la vie, et c'est sur le tableau des phénomènes de la nature que viennent se reposer nos regards : tantôt ils se por-

tent sur l'ensemble et parcourent curieusement la vaste étendue de l'horizon, tantôt ils s'arrêtent sur un point, et suivent le cours d'un phénomène ou les périodes d'un mouvement. Nous sommes nés observateurs, et sous ce rapport tous les hommes sont physiciens. Mais en réfléchissant sur tant de choses diverses, nous prenons l'habitude de généraliser les résultats de nos réflexions; nous sortons des limites de ce que voient nos yeux et de ce qui se démontre de soi-même; nous voulons rapprocher les effets observés pour remonter jusqu'aux causes qui les produisent, et c'est alors que commence l'incertitude de nos jugemens; c'est alors que les bons esprits font voir toute leur puissance, et les autres toute leur faiblesse. Qu'y a-t-il de plus curieux pour l'histoire de l'intelligence, que de suivre, à travers le développement des siècles, les idées singulières que les hommes se sont faites successivement sur les propriétés des corps, sur les élémens qui les composent, sur les principes et sur les causes qui agitent la matière, et qui maintiennent l'harmonie du monde? Quelle confusion d'hypothèses et d'erreurs, au milieu desquelles les hommes de génie ont jeté çà et là quelques vérités fécondes! Et même de notre temps, qu'y a-t-il de plus curieux que d'interroger les divers esprits, depuis les plus vulgaires jusqu'aux plus habiles, et d'entendre leurs idées sur les phénomènes de la nature, sur les effets de l'air et de l'atmosphère, sur l'équilibre des eaux tout autour de la terre, sur les effets sans nombre de la chaleur et de la lumière, sur la météorologie, sur la cause du tonnerre, par exemple, que l'on n'ose plus personnifier, il est vrai, mais que plusieurs se représentent encore comme ayant une forme et un corps! Quelle variété d'images et de conceptions! quelle différence entre les hommes! quelle différence entre les peuples! On peut dire que dans une seule génération se retrouvent les pensées de tous les siècles; dans un esprit inculte chez un peuple ignorant, toutes les erreurs avec tous les préjugés; dans un esprit cultivé, chez

un peuple éclairé, toutes les connaissances qui se sont transmises d'âge en âge, et toutes les lois générales auxquelles la raison ait pu s'élever.

La physique, qu'on appelle aussi la philosophie naturelle, n'est qu'une partie de ces connaissances, qui forment maintenant le domaine de l'intelligence; elle en est la partie philosophique et fondamentale. On a coutume de dire qu'elle a pour objet les propriétés des corps, et les actions qu'ils exercent à de grandes distances; c'est en effet ce qu'on en peut dire de plus simple, quand on veut absolument en dire quelque chose. Mais tenter de définir une science, c'est consentir à être inintelligible pour ceux qui ne savent pas au moins les premiers élémens de cette science; ainsi on nous permettra sans doute de commencer l'étude de la physique, plutôt par les notions générales sur lesquelles elle repose que par des définitions qui seraient nécessairement incomplètes.

2. *De l'Espace.* — Nous concevons très-facilement les longueurs et les distances; une longueur de six pieds est une chose qui nous est familière, et nous concevons avec la même facilité la distance qui nous sépare d'un point éloigné de l'horizon, ou encore celle qui se trouve entre nous et une étoile; et c'est la plus grande distance à laquelle la matière agit sur nous. Nous comprenons tous de la même manière les étendues en superficie, comme la surface d'un grand lac ou la surface de la mer, et les étendues en volume, comme un pied cube de marbre ou de pierre, le volume d'une maison ou celui d'une montagne. Concevons donc un pied cube de marbre qui soit suspendu au milieu d'une masse d'eau; nous savons qu'il peut être déplacé, et qu'à l'instant l'eau vient remplir la place qu'il occupait: mais imaginons que l'eau n'y vienne pas, qu'elle soit arrêtée de quelque manière; ou plutôt concevons que le cube de marbre puisse être anéanti, qu'il ne reste de lui que ses six faces, et qu'elles soient capables de retenir l'eau exactement

des six côtés différens. Ce volume où il n'y aurait plus de marbre, et où il n'y aurait point d'eau, ni aucune autre chose, c'est de l'*espace*, c'est l'espace qu'occupait le pied cube de marbre et que nous pouvons concevoir privé de toute matière. Quelques métahysiciens l'appellent l'*espace pur*, et les physiciens l'appellent l'*espace vide*. Nous en avons limité l'étendue pour en avoir une idée plus juste; mais ce que nous disons d'un pied cube pourrait se dire d'un volume beaucoup plus grand. Nous pouvons concevoir qu'une montagne s'anéantisse, depuis son sommet jusqu'à sa base, et notre esprit conserverait encore l'idée du volume ou de l'espace qu'elle occupait. Il en serait de même de tout le globe de la terre : et il ne faut pas plus d'effort pour concevoir le volume qu'il occupe, que pour concevoir le volume occupé par une bille de billard ou par un boulet de canon.

Au dessus de nos têtes est l'atmosphère, et au dessus de l'atmosphère est le vide du ciel. Notre esprit peut s'élever aussi dans ces régions : il peut se fatiguer à les parcourir dans tous les sens; il rencontre, au milieu de ces espaces, des corps comme la terre, des astres sur lesquels il se repose; mais quelle distance les sépare, quel abîme est au delà ? Cette voûte du ciel n'est qu'une apparence; elle n'a rien de solide, et, fût-elle solide comme du diamant, notre esprit ne s'y arrête pas; il en pénètre la profondeur; il poursuit l'espace au delà de cette voûte et au delà des étoiles; il conçoit que toute limite est impossible; il embrasse l'immensité, et conçoit quelque chose de plus grand. Ainsi l'espace est indéfini pour nos conceptions, et, par conséquent, infini dans la réalité.

Une portion finie de l'espace est dans notre langage ce que nous appelons l'*étendue*; mais il arrive souvent que l'on dit, l'espace d'un pied cube, au lieu de dire l'étendue d'un pied cube. Il n'en résulte aucune confusion pour les discussions physiques.

3. *Du temps.* — On dit communément que l'homme, à l'aspect des phénomènes naturels, prend l'idée de succession et celle de *temps.* Ainsi, dit-on, le printemps succède à l'hiver, et le jour à la nuit; voilà l'idée de succession : l'eau qui coule succède à l'eau qui s'est écoulée, le flux de la mer succède au reflux; voilà l'image du temps. Mais il n'est besoin ni de phénomènes extérieurs, ni d'aucune affection des sens pour que nous ayons présentement l'idée du temps : nous pensons, et nous avons la conscience de nos pensées; nous pensons successivement, et nous avons l'idée de succession et de continuité. Sans doute, ce phénomène intérieur ne nous permet de compter ni les heures, ni les jours, ni les années; mais avoir l'idée du temps et avoir le moyen de le mesurer sont deux choses différentes. Tous les mouvemens extérieurs pourraient être suspendus, les astres pourraient cesser de tourner, les nuages pourraient être immobiles, l'eau cesser de couler; et cependant, au milieu de ce repos universel, nous saurions encore que le temps se peut subdiviser, bien que nous n'eussions plus aucune mesure de ces subdivisions.

L'idée du temps et celle de l'espace se retrouvent dans toutes nos perceptions et dans toutes nos idées; le néant est incompréhensible pour nous, ou plutôt, quand nous essayons de le comprendre, nous ne comprenons autre chose que l'espace et le temps.

4. *De la Matière et des divers états des corps.* — L'idée d'espace est une idée complète qui se suffit à elle-même, c'est-à-dire que nous pouvons concevoir l'espace et rien dans cet espace; mais elle n'est point une idée exclusive avec laquelle rien ne se puisse associer. Dans l'espace, nous pouvons concevoir *l'impénétrabilité*, et l'impénétrabilité c'est *la matière.* On n'a pas raison de dire que la matière a deux propriétés essentielles : *l'étendue* et *l'impénétrabilité*; ce ne sont pas des propriétés, c'est une défi-

nition. On conçoit l'impénétrabilité; on l'appelle matière, et voilà tout.

Nous pouvons concevoir l'espace limité ou indéfini, et nous pouvons comprendre de même que l'impénétrabilité soit limitée ou indéfinie, qu'elle occupe un petit volume comme une goutte d'eau, ou un grand volume comme le globe de la terre. Ici se présente une autre idée fondamentale : nous pouvons concevoir que l'impénétrabilité soit continue et inséparable, ou bien qu'elle soit discontinue, et, par conséquent, séparable. L'impénétrabilité inséparable est ce qu'on appelle un *atome.* L'idée de grandeur ou de petitesse n'entre pour rien dans la conception d'un atome, non plus que l'idée de forme : on peut concevoir un atome très-petit ou un atome grand comme une montagne; on peut concevoir qu'il soit rond, carré, pointu, ou de toute autre forme bizarre que l'imagination se plaira à inventer. Seulement nous supposons bien que le monde entier n'est pas un grand atome, et que la matière n'est pas tout d'une pièce; car la terre et la lune sont deux fragmens séparés, et à la surface de la terre nous voyons que la matière en général se brise et se désunit : ce qui prouve assez, d'après notre définition, que la terre non plus n'est pas un atome. Sur le reste, c'est à l'expérience à nous instruire : s'il y a des atomes d'une grandeur sensible, nous les verrons et nous pourrons constater leur forme; mais si tous les atomes de la matière sont tellement petits et ténus que l'expérience directe ne puisse pas nous les faire voir, alors nous serons fort embarrassés de prendre un parti, et nous trouverons qu'il est bien plus facile de concevoir les atomes que de prouver leur existence. C'est là précisément l'indécision dans laquelle se trouvent les physiciens et les chimistes; par aucun moyen on ne peut rendre un atome perceptible, et nos sens ne peuvent rien pour résoudre la question d'une manière directe. Cependant l'ensemble des phénomènes indique, sinon d'une manière certaine, du

moins d'une manière très probable, que la matière n'est pas indéfiniment séparable en parties, qu'à un certain degré de petitesse, qui est bien au dessous de ce que nos sens peuvent saisir, il y a de dernières parties qui sont absolument inséparables et qui sont de véritables atomes. Toutes les découvertes récentes semblent confirmer cette opinion, et c'est aujourd'hui celle qu'on adopte exclusivement. Elle est très-commode en physique; mais ce ne serait pas une raison de l'adopter, si d'ailleurs on ne prouvait pas qu'elle est la plus vraisemblable; car on sait bien qu'en toutes choses les explications qui semblent les plus commodes ne sont pas toujours celles qui sont au fond les plus vraies.

Ainsi, nous admettons l'existence des atomes, comme une vérité fondamentale qui doit nous servir de guide dans nos recherches. Une réunion d'atomes est ce qu'on appelle un *corps*. Les corps auront en général un plus grand ou un plus petit volume, suivant qu'ils seront composés d'un nombre d'atomes plus grand ou plus petit; ils auront des apparences différentes, si les atomes sont diversement arrangés pour les composer; ils auront une différence un peu plus marquée, si les atomes diffèrent par leur forme ou leur grandeur, et enfin ils pourront être essentiellement différens, s'il existe des atomes qui diffèrent par leur nature substantielle.

Dans un volume donné d'un corps, dans une boule d'or, par exemple, on ne suppose pas que tous les atomes soient arrangés de la même manière, et tous également distans les uns des autres; mais on est conduit à supposer que plusieurs atomes sont groupés de manière à former ce qu'on nomme une *molécule*, une *particule*, et que les molécules sont groupées à leur tour pour donner au corps sa structure et son ensemble. Ainsi deux molécules ont en général bien plus de distance entre elles que n'en ont entre eux les atomes qui les composent. C'est là le sens propre

qu'on attache à ces mots, *molécules* et *particules*, qui sont à peu près synonymes; mais quelquefois on les prend dans un autre sens : comme quand on dit, les molécules des corps sont ébranlées par le choc, elles sont en vibration dans les corps sonores, elles sont dilatées par la chaleur, traversées par la lumière, etc.; alors on ne veut plus parler strictement de chaque groupe d'atomes en particulier, mais on veut parler, d'une manière vague, de petites portions que l'on conçoit dans l'intérieur des corps et que l'on sépare par la pensée. Enfin, quand on brise un corps, on se sert encore des mots molécules et particules pour en désigner les plus petits fragmens.

Nous n'observons que trois états différens dans tous les corps qui sont soumis à nos observations; ils sont *solides*, comme les pierres, les métaux et les tissus organiques; ils sont *liquides*, comme le mercure, l'eau, l'esprit-de-vin ou les fluides des corps vivans; enfin ils sont *gazeux*, comme l'air. Les liquides et les gaz se désignent quelquefois par un nom commun; on les appelle des *fluides*. Une chose digne de remarque, c'est qu'un même corps peut être tantôt solide, comme la glace, tantôt liquide, comme l'eau, tantôt gazeux, comme la vapeur. Nous verrons dans quelles circonstances se produisent ces mutations; pour le moment, il suffit de les indiquer, parce qu'elles sont connues de tout le monde, et parce qu'en y réfléchissant on habitue l'esprit à pénétrer dans l'intérieur des corps et à bien comprendre qu'ils ne sont que des assemblages ou des agglomérations d'atomes; que ces atomes sont séparés les uns des autres, et maintenus à des distances plus ou moins grandes, et qu'enfin il est possible que, sans se toucher, ils agissent de concert, et se communiquent des pressions ou des mouvemens.

5. *Des Forces*. — Les atomes simplement posés à côté les uns des autres ne pourraient constituer ni les corps solides, ni les autres corps de la nature; ils

ne feraient tout au plus qu'un amas incohérent et instable, pareil à un monceau de sable ou de poussière. Une pierre ou un morceau de fer sont des corps solides et résistans : il faut donc qu'il y ait *quelque chose* qui retienne les atomes, qui les attache l'un à l'autre, qui les fixe à leur place. Les corps se briseraient sans effort, s'il n'y avait que des atomes simplement juxtaposés, ou plutôt il n'existerait pas de corps; il n'existerait que de la poussière. Nous concevons que dans un morceau de fer un atome quelconque est pressé contre les atomes voisins comme un bloc de pierre est pressé contre le sol; pour soulever la pierre il faut un certain effort; pour arracher l'atome si on pouvait le saisir, il faudrait aussi un effort plus ou moins grand. Ces pressions sont des effets qui pourraient ne pas être et qui supposent par conséquent qu'il y a des causes pour les produire. Ces *causes*, quoique très différentes dans leur nature, sont ce que l'on appelle en général des *forces*.

Ainsi, il y a des forces qui agissent sur les atomes de fer, qui les pressent les uns contre les autres, qui les retiennent en leur lieu, et qui donnent à la masse cette fixité que nous observons. De même, il y a des forces qui agissent sur les molécules de tous les corps solides et qui leur donnent, à l'intérieur, une structure déterminée, et à l'extérieur une forme permanente. Enfin, comme il n'y a pas de corps qui n'ait une certaine manière d'être, et une certaine dépendance entre ses parties, on en conclut que, là où il se trouve plusieurs atomes voisins, il y a toujours entre eux une action mutuelle, par laquelle ils se sollicitent les uns les autres et prennent un arrangement déterminé.

Les liquides, qui sont si mobiles, ont eux-mêmes cette dépendance entre toutes leurs parties voisines : une goutte d'eau a toujours une forme particulière, soit qu'on l'observe sur quelque surface, ou plutôt sur les plantes où

elle se dépose en rosée, soit qu'on l'observe aux extrémités des corps où elle se tient suspendue. Cette forme qu'elle prend est le résultat de l'action de ses molécules, car sans actions mutuelles, elles resteraient séparées et tomberaient isolément.

L'air, qui est invisible et qui est si subtil, n'est pas une exception à cette loi générale. Il est impénétrable, puisqu'il résiste quand il est enfermé dans une vessie, dans un ballon ou dans un autre espace quelconque. Donc il est aussi composé d'atomes et de molécules; donc ses diverses parties exercent aussi une action mutuelle les unes sur les autres : entre mille phénomènes qui en sont la preuve, nous citerons seulement le phénomène de la respiration, que tout le monde peut observer. L'air extérieur pénètre dans les poumons, à mesure que la poitrine s'ouvre pour le recevoir; ainsi les molécules du dehors agissent sur les molécules du dedans, elles les pressent et les forcent d'entrer; et, quand l'air est enfermé dans la poitrine, les molécules intérieures réagissent aussi les unes sur les autres, pour en remplir toute la capacité, comme elles réagissent les unes sur les autres, pour se répandre dans toute l'étendue d'un vase, quelque petit ou quelque grand qu'il soit. Ces forces, qui agissent sans cesse dans l'intérieur d'un corps entre toutes les molécules voisines, ou entre tous les atomes qui composent une molécule, s'apellent *forces moléculaires*, ou *attractions moléculaires*; il serait mieux de les appeler *actions moléculaires*, ou *forces atomistiques*, ou *forces constitutives* des corps, puisqu'en effet ce sont ces forces qui donnent aux corps leurs constitutions particulières et leurs modes d'existence. Nous examinerons plus tard s'il n'y a qu'une seule force de cette nature, ou s'il y en a plusieurs qui se combattent, qui se balancent, et qui sont tour à tour plus grandes ou plus petites.

Outre les forces moléculaires, il y a des forces d'une

autre nature : les corps tombent d'eux-mêmes, quand on les abandonne; les rivières coulent sans cesse; le soleil semble tourner autour de la terre : voilà des *mouvemens* que nous observons, et nous jugeons dans notre pensée que la matière pourrait *exister* sans que ces mouvemens fussent *produits*. Ils ne sont donc que des *effets* accidentels dus à des causes déterminées. Ces causes du déplacement des corps ou des *mouvemens de translation* s'appellent aussi des *forces* ou des *puissances*. Elles ont sans doute des rapports avec les forces moléculaires, qui peuvent aussi, dans certains cas, imprimer des mouvemens de translation; mais en général on les distingue, comme nous le verrons plus loin.

6. *Du Repos et du Mouvement.* — Les idées de *repos* et de *mouvement* sont, comme l'idée d'impénétrabilité, des conceptions simples et primitives, qui ne peuvent ni se décomposer ni se définir. On conçoit le repos, on conçoit le mouvement, on peut aider un esprit à comprendre ces choses d'une manière plus générale ou plus féconde; mais dans aucune langue on ne peut les expliquer ni l'une ni l'autre que par des mots équivalens. Dès que nous avons l'idée d'espace et l'idée de nous-mêmes, nous nous prenons pour un centre autour duquel l'espace indéfini se développe, et nous avons l'idée de direction, de distance et de situations respectives. Nous avons besoin de l'aspect du ciel pour nous *orienter* par rapport au soleil et aux astres; mais nous n'avons besoin que du sentiment de nous-mêmes pour nous *orienter* par rapport à nous : à moins de tout confondre, nous ne confondons pas l'espace qui est devant nous avec l'espace qui est au dessus de nos têtes ou sous nos pieds, ni celui qui est à droite avec celui qui est à gauche. L'homme qui a vécu dans les ténèbres, soit à la surface de la terre, soit au fond des mines, ne sait ce que c'est que l'orient, l'occident ou les pôles du monde, toutes choses qui se rap-

portent à l'aspect du ciel qu'il ne connaît pas; cependant il conçoit l'espace, et par la pensée il le sépare en diverses régions qui ont rapport à lui-même; en régions latérales, antérieures et postérieures, et en régions hautes ou régions basses. Nous pouvons tous faire abstraction de la matière sans pouvoir jamais faire abstraction de nous-mêmes; et, une fois que nous avons de la sorte pris possession de l'espace, nous pouvons comprendre que rien ne change plus ni en nous ni autour de nous : nous avons alors l'idée de *repos* et de *repos absolu;* car on appelle repos absolu d'un corps la persistance réelle de ce corps dans le même lieu de l'espace. De même, nous pouvons comprendre qu'il arrive un changement de place; nous pouvons comprendre que nous avançons ou que nous reculons dans une de ces régions idéales; que nous allons d'un côté ou de l'autre; que nous montons ou que nous descendons : alors nous avons l'idée du *mouvement* et l'idée de *mouvement absolu*; car on appelle *mouvement absolu* d'un corps le déplacement réel de ce corps dans l'espace. Il y a deux choses essentielles à considérer dans le mouvement : sa direction et sa lenteur ou sa rapidité, qu'il ne faut pas confondre avec sa vitesse dont nous parlerons plus loin. Si le *mobile*, ou le corps qui se meut, parcourt une ligne droite, le mouvement est dit *rectiligne*, et la droite parcourue par le mobile est la direction du mouvement; au contraire, si le mobile parcourt une courbe quelconque, le mouvement est dit *curviligne*, et l'on dit encore que la courbe qu'il parcourt est en général la direction du mouvement. Mais dans ce dernier cas, pour exprimer sa direction dans un instant quelconque, il faut remarquer qu'entre deux points d'une courbe, on peut mener une infinité de tangentes ou de lignes droites qui ne font que toucher la courbe; alors le mobile étant en même temps sur la courbe et sur une tangente, on dit que la direction de son mouvement est celle de la tangente sur

laquelle il se trouve. Ainsi, dans le mouvement curviligne, le mobile change à chaque instant de direction, et s'il parcourt un cercle entier, il a véritablement passé par toutes les directions possibles. Pour la lenteur et la rapidité du mouvement, on dit en mécanique, comme dans le langage ordinaire, qu'un mouvement est plus lent quand le mobile parcourt moins d'espace dans le même temps, et qu'il est plus rapide quand il parcourt un espace plus grand. Seulement il faut prendre garde que de deux mouvemens donnés, celui qui serait le plus lent, en ne considérant que les espaces parcourus pendant une seconde par exemple, pourrait être le plus rapide, si l'on considérait les espaces parcourus pendant une heure ou pendant un jour; car on conçoit qu'un même mouvement ment peut se ralentir avec le temps ou devenir plus rapide.

Le repos absolu et le mouvement absolu ne sont que des conceptions de notre esprit : dans l'arrangement du monde, il n'y a rien d'absolu pour nous; tout est relatif et conditionnel. Ainsi, toutes les choses qui nous paraissent les plus immobiles à la surface de la terre ne sont que dans un repos relatif. Les arbres sont en repos par rapport aux montagnes, et les montagnes sont en repos par rapport au sol et à la masse du globe; mais les arbres et les montagnes sont emportés avec nous dans le vaste orbite de notre planète, et tous ensemble nous parcourons en une seconde dix fois plus d'espace que n'en parcourt dans le même temps un boulet qui sort du canon. Cependant, en parcourant aussi vite les espaces du ciel, nous ne pouvons pas juger de notre mouvement absolu, car il faudrait savoir si le soleil est immobile au centre du monde. Or, tout semble annoncer que le soleil emporte avec lui toutes les planètes, comme la terre emporte avec elle son atmosphère et ses nuages, ses arbres et ses montagnes. Le soleil lui-même n'est qu'une planète imperceptible, par

rapport à un autre soleil autour duquel il tourne, et cet autre soleil est sans doute emporté lui-même dans l'espace, sans qu'on puisse assigner ni même imaginer un centre fixe autour duquel toutes ces révolutions s'accomplissent.

7. *De l'Inertie.* — Il y a deux manières de concevoir les forces qui agissent sur la matière inorganique. On peut supposer qu'elles ont une existence séparée, qu'elles sont hors de la matière, et qu'elles en sont indépendantes; ou bien on peut admettre qu'elles sont inhérentes à la matière elle-même, et qu'elles ne sont que des propriétés permanentes, qui lui ont été primitivement données. Ces deux suppositions reviennent au fond à une seule et même chose; mais, quelle que soit l'idée qu'on puisse prendre de leur origine et de leur mode d'existence, il y a sur elles et sur la matière deux principes fondamentaux qui résultent de tous les phénomènes naturels qui se produisent à nos yeux, et qui se renouvellent ou se perpétuent depuis tant de siècles. Ces deux principes constituent ce qu'on appelle l'*inertie* de la matière. Le premier est que, toutes les forces qui agissent sur la matière cessant d'agir à un instant donné, la matière conserve son état de repos ou de mouvement. Le second est que toutes les forces sont soumises à des lois d'une infaillible stabilité. Il résulte du premier principe qu'un atome de matière ne peut ni se donner du mouvement ni altérer celui qu'il aurait reçu; et si deux atomes de matière peuvent se donner du mouvement l'un à l'autre par leurs attractions, ou en général par leurs actions mutuelles, comme l'attraction de la terre donne du mouvement à une pierre qu'on abandonne à elle-même, il résulte du second principe que ce mouvement se produit suivant une loi déterminée qui n'a éprouvé aucun changement depuis que le monde existe. Ainsi, tous les changemens que subit la matière, soit dans son état, soit dans son repos, soit dans son mouvement, nous devons les attribuer à des causes ou

à des forces particulières; tantôt à des forces nouvelles qui surviennent tout à coup, tantôt à des forces permanentes qui continuent d'agir, et qui règlent leurs actions suivant les lois immuables auxquelles elles sont soumises. Si un corps se brise ou se déplace, s'il devient plus dur ou plus mou, s'il se refroidit ou s'il s'échauffe, s'il se liquéfie ou s'il se vaporise, c'est qu'une cause est survenue qui lui imprime ces modifications. Jamais une pierre ne s'est brisée d'elle-même, jamais elle ne s'est soulevée sur le sol, jamais on ne l'a vue ni se durcir, ni se ramollir, ni s'échauffer, ni se refroidir, ni se liquéfier d'elle-même, ni disparaître en vapeurs. Si lo'n coupe le fil qui soutient un corps, l'on le voit qui tombe et qui se précipite d'un mouvement de plus en plus rapide. Il fallait une cause pour le faire tomber, et c'est cette même cause qui continue d'agir et qui presse son mouvement par ses actions répétées. La terre, dans son orbite autour du soleil, éprouve des variations perpétuelles : tantôt sa course devient plus lente, tantôt plus rapide, et cependant rien n'est accidentel dans ces périodes; rien n'est fortuit ni imprévu. C'est toujours la même cause qui préside à ces mouvemens; mais c'est une cause qui change d'énergie, et c'est par la loi de ces changemens que se maintient l'équilibre du monde.

---

## CHAPITRE II.

### PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS.

*Divisibilité. — Porosité. — Compressibilité. — Élasticité. — Dilatabilité.*

8. On appelle propriétés générales des corps celles qui sont communes à tous les corps, quel que soit l'état sous lequel ils se présentent. Celles de ces propriétés qu'il importe le plus de connaître dès le commencement de la physique sont :

1° La divisibilité;

2° La porosité;

3° La compressibilité;

4° L'élasticité;

5° La dilatabilité.

On pourra remarquer qu'elles dépendent de la structure des corps et de l'arrangement intérieur de leurs parties constituantes. Si les corps n'étaient pas composés, ils ne seraient pas divisibles, ni poreux, ni compressibles, et ils ne pourraient pas non plus avoir le ressort qui constitue l'élasticité, ni la faculté d'augmenter de volume, qui constitue la dilatabilité. C'est pour cette raison qu'il ne serait pas exact de dire que ces propriétés sont des propriétés générales de la matière, car elles ne peuvent en aucune sorte appartenir aux atomes, tels que nous les pouvons comprendre et tels que nous les avons définis : ce sont des propriétés de l'ensemble, et non pas des propriétés des élémens.

9. *Divisibilité.* — Tous les corps peuvent être divisés en plusieurs parties, et ces parties elles-mêmes en particules de plus en plus petites, jusqu'à ce qu'enfin elles échappent

à nos sens et à nos instrumens. Cette propriété, prise en général, est la chose du monde la plus connue : chacun sait que les barres de métal se rompent sous un certain effort, que les pierres se cassent sous le marteau, et que le diamant, qui est le plus dur et le plus inaltérable des corps que l'on connaisse, peut être lui-même réduit en fines poussières qui servent à polir sa surface. Mais ce qui doit nous occuper, et ce qui a dû surtout exciter la curiosité des plus anciens observateurs, c'est de savoir si tous les corps sont en effet divisibles, et s'ils le sont tous jusqu'au dernier degré de petitesse que nous puissions percevoir.

Pour les corps qui sont liquides comme l'eau, il est évident qu'ils peuvent être divisés et subdivisés en particules si petites qu'elles soient à la fin tout ce que le toucher peut sentir de plus ténu et tout ce que l'œil peut voir de plus délié; car en les regardant nous ne voyons sur leur surface aucune sorte d'inégalité, et en plongeant la main dans leur masse nous ne pouvons pas palper leurs molécules et les sentir distinctement, comme nous sentirions des parcelles de sable.

Pour les solides, nous ne pouvons pas juger aussi facilement de la grosseur ou de la ténuité des dernières parties qui les composent. Rien ne nous indique d'avance que parmi ces corps il ne s'en trouve pas qui, étant divisés jusqu'à une certaine limite, se refuseraient à une division ultérieure, et dont les parties élémentaires, encore grosses et palpables, ou du moins très-perceptibles, ne pourraient plus être ni subdivisées davantage ni altérées en aucune manière. Aussi les anciens avaient eu grand soin d'expérimenter, dans cette vue, sur tous les corps qu'ils connaissaient; et les modernes, qui ont tiré du sein de la terre tant de substances nouvelles, les ont de même éprouvées pour savoir jusqu'à quel point elles se divisent. Ce n'est qu'après toutes ces expériences qu'il a été permis de conclure que pour tous les corps connus il n'y a aucune limite percep-

tible à la divisibilité. Cependant il ne serait pas rigoureux d'étendre cette conséquence à tous les corps qui existent : par cela seul qu'il a fallu l'expérience pour résoudre la question, la question n'est résolue rigoureusement que pour les corps sur lesquels on a expérimenté. Ainsi, il n'est pas impossible que les volcans fassent sortir un jour des entrailles de la terre quelques substances dont les atomes soient pour nous d'une grandeur perceptible, et peut-être de telles substances se trouvent fort communément dans la masse des autres planètes.

Dans l'impossibilité de reproduire toutes les expériences qui ont été faites sur tous les corps connus, nous devons nous borner à citer quelques-uns des exemples les plus frappans, pour montrer, d'une part, que nos sens ne peuvent atteindre qu'à un certain degré de petitesse, et, d'une autre part, que ces dernières parcelles qui commencent à nous échapper sont encore composées d'un nombre immense de parties distinctes.

C'est par le sens du toucher et par celui de la vue que nous jugeons de la grandeur des objets; le goût et l'odorat nous instruisent de leur présence, sans rien nous apprendre de leur forme; et ce qui est une chose digne de remarque, c'est que par le sens de l'ouïe, qui est chez les aveugles un instrument d'une si merveilleuse délicatesse pour juger des distances, nous ne pourrions jamais nous élever à l'idée d'une figure déterminée, ni à l'idée de la grandeur, ni à celle de la petitesse.

Le sens du toucher est répandu dans tout le corps, soit à l'intérieur, soit à la surface; mais il s'exerce très-différemment dans les différentes parties. A l'intérieur, nous n'avons que des sensations vagues des corps étrangers qui nous touchent ou qui nous blessent : et dès que le contact est un peu prolongé, toute sensation locale disparaît; nous n'éprouvons plus qu'un sentiment général, une manière d'être plus ou moins douloureuse, dont nous ne démêlons

ni le siége ni la cause. C'est sans doute par une raison semblable que nous ne sentons rien en dedans de nous-mêmes, ni les substances solides, comme les os, ni les substances liquides, comme le sang, même quand elles circulent avec une grande rapidité. A l'extérieur, tous les points de la surface peuvent sentir distinctement le contact des corps étrangers; mais c'est la main qui est le véritable organe du toucher; on sait que c'est par elle que nous prenons l'idée des contours et des formes géométriques des corps, et que c'est par elle aussi que nous pouvons percevoir les objets les plus déliés. Sur une surface polie, la main exercée d'un aveugle peut sentir des grains de poussière d'une telle ténuité qu'il en faudrait des centaines rangées à côté l'un de l'autre pour faire la longueur d'une ligne. Une main moins délicate peut sentir distinctement un fil de laine ou un fil de soie d'un seul brin, et cependant ces fils n'ont pour l'ordinaire que les dimensions suivantes :

| | Diamètres en millimètres. | | |
|---|---|---|---|
| Laine ordinaire. . . . | $0^{mm},05$ | ou $\frac{5}{100}$ | de millimètre. |
| Mérinos. . . . . . . . . | $0^{mm},02$ | . . $\frac{2}{100}$ | . . . |
| Soie. . . . . . . . . . . . | $0^{mm},01$ | . . $\frac{1}{100}$ | . . . |

La plupart des fourrures recherchées, comme le castor et l'hermine, ont une finesse qui est comprise entre le mérinos et la soie, et la plupart des laines de différentes espèces sont comprises entre le mérinos et la laine ordinaire. Ces filamens, qui ont une si grande finesse et qui sont à peu près les dernières grandeurs que le toucher puisse percevoir, sont cependant des corps très-composés; chacun d'eux a une structure particulière que le sens de la vue peut seul nous faire connaître; chacun d'eux contient des élémens très-divers, qui sont préparés par la nutrition, sécrétés par les organes, et que la chimie peut séparer de nouveau et remettre en évidence.

Le verre, qui est un produit de l'art, et dans la composition duquel il entre plusieurs substances différentes, peut être filé comme la soie. Pour en faire l'expérience, on prend un tube de verre assez fin, on le présente, vers le milieu de sa longueur, à la flamme d'une bougie, et quand il est chauffé dans cet endroit jusqu'au rouge-blanc, on tire les deux moitiés comme pour les séparer; alors il se fait entre elles un fil d'une brasse de longueur, qui a toute la finesse de la soie, et qui en a presque la souplesse; cependant ce filament de verre est encore assez épais pour former lui-même un tube ayant ses parois et son canal intérieur par lequel on peut faire passer des liquides.

Nous pourrions pousser bien plus loin les expériences sur notre sensibilité organique, si les corps ne devenaient pas trop flexibles à mesure qu'on les divise en filamens plus minces. Si, par exemple, un fil mille fois plus fin qu'un fil de soie pouvait avoir la rigidité d'une flèche, il serait curieux d'observer l'effet de ses piqûres sur les divers points de la peau; on trouverait sans doute qu'une flèche de cette espèce pourrait nous traverser le corps de toutes parts, sans se faire sentir et sans troubler le moins du monde les fonctions de la vie.

Le poli que prennent les corps est une autre preuve de la divisibilité de la matière, et le contact des surfaces polies est une autre preuve de la limite des perceptions du toucher.

L'acier poli, les métaux, le diamant et les pierres précieuses ne sont pour la main qu'une seule et même chose; en les touchant nous ne sentons qu'une surface géométrique, et cependant toutes ces superficies sont travaillées avec les fines poussières de l'émeri ou du diamant, et chaque grain de poussière y trace un sillon proportionné à sa grandeur; voilà des cavités et des saillies que le toucher ne peut plus sentir.

Les dernières parcelles de matière qui échappent au toucher sont encore perceptibles à la vue. L'œil aperçoit sur

la pierre de touche les parcelles d'or qui servent à l'essai, et dont la main la plus délicate ne sentirait pas la présence. Les bulles de savon qui donnent de si brillantes couleurs sont de minces lames d'eau, dont Newton a mesuré l'épaisseur. Auprès de leur sommet elles n'ont ordinairement que $\frac{1}{10000}$ de millimètre, et elles se réduisent à $\frac{1}{100000}$ quand elles laissent voir une tache noire quelques instans avant d'éclater. Les ailes transparentes des insectes n'ont qu'une épaisseur à peu près pareille, et c'est pour cette raison qu'elles brillent du même éclat. Enfin les pellicules de verre que l'on souffle à la lampe ont aussi la même ténuité et les mêmes couleurs; car c'est une loi générale que tous les corps transparens se colorent des plus vives nuances quand ils n'ont plus que quelques cent-millièmes de millimètre d'épaisseur; mais quand ils sont plus minces ils deviennent tout-à-fait invisibles. Une bulle de savon qui n'aurait que $\frac{1}{1000000}$ de millimètre d'épaisseur ne pourrait être aperçue par aucun moyen, lors même qu'elle aurait un pied de diamètre.

Pour les corps qui ne s'étendent pas en superficie, et qui ne sont grands que dans une seule dimension, comme les fils de métal ou les filamens organiques, il serait difficile d'assigner les limites de grandeur où l'on cesse de les voir nettement à l'œil nu. Ces limites dépendent de la perfection de l'organe et de l'éclat de la lumière; mais au moyen de loupes et de microscopes il n'est pas besoin d'être fort exercé ni d'avoir un organe très-parfait pour apercevoir d'une manière distincte des fils qui n'ont de diamètre que quelques millièmes de millimètre.

On sait que dans les arts on emploie des fils de cuivre, de fer ou d'argent qui sont aussi fins que des cheveux. La traction qu'on exerce pour les passer à la filière est ce qui limite leur finesse, parce qu'ils deviennent trop faibles pour y résister; mais par divers procédés ingénieux qui ne s'appliquent qu'à certains métaux, on parvient à faire des

fils qui sont plus fins que la soie. Le docteur Wollaston a fait des fils de platine qui n'avaient que $\frac{1}{1200}$ de millimètre d'épaisseur, c'est-à-dire qu'il faudrait plus de cent quarante de ces fils pour former un faisceau de la grosseur d'un fil de soie d'un seul brin. Quoique le platine soit le plus pesant de tous les corps connus, trois mille pieds de longueur d'un tel fil ne pèsent pas plus d'un grain. Pour arriver à ce résultat, qui paraît être le dernier terme que l'art puisse atteindre, le docteur Wollaston prend un fil de platine de $\frac{1}{100}$ de pouce anglais d'épaisseur, qu'il fixe dans l'axe d'un moule cylindrique de $\frac{1}{5}$ de pouce de diamètre; il remplit le moule d'argent en fusion, et il a ainsi un cylindre d'argent dont l'axe est en platine. En le faisant passer à la filière, les deux métaux s'allongent également et conservent leurs rapports d'épaisseurs; enfin, quand le fil composé est à son plus grand degré de finesse, on le fait bouillir dans l'acide nitrique, qui dissout l'enveloppe d'argent, et qui met à nu le fil de platine.

Puisque la matière peut s'amincir en superficie comme dans les bulles de savon ou les lames de verre, et se rétrécir en longueur comme dans les fils de platine, il est évident qu'elle peut s'atténuer de la même manière dans toutes les dimensions. Ainsi, nous pouvons juger que toutes les parcelles que nous apercevons encore sont des parcelles très-composées. Mais le règne organique nous en offre des preuves encore plus frappantes. On sait maintenant d'une manière certaine que le sang n'est pas un liquide uniforme tel qu'il paraît à la vue, et que sa substance se compose d'une foule de petits globules flottant dans un liquide particulier qu'on appelle le *sérum*. Cette découverte a été faite à peu près à la même époque en Italie par Malpighi, et en Hollande par Leeuwenhoeck vers 1660, environ quarante ans après que Harvey eut démontré la circulation du sang. Ces globules sont sphériques dans le sang de l'homme et dans celui des mammifères, et ils sont allongés dans les

oiseaux et les poissons. Leurs dimensions varient suivant les espèces; dans le callitriche d'Afrique, ils sont les plus gros que l'on ait observés, et s'élèvent à $\frac{1}{125}$ de millimètre : dans la chèvre, ils sont les plus petits, et ne vont qu'à $\frac{1}{350}$. Les globules du sang de l'homme sont intermédiaires, et paraissent constamment de $\frac{1}{150}$ de millimètre. On peut calculer d'après cette donnée qu'il y en a près d'un million dans la goutte de sang d'un millimètre cube, qui pourrait être suspendue à la pointe d'une aiguille. Dans presque tous les autres mammifères, les dimensions des globules paraissent comprises entre les deux dernières limites. Ces globules ne sont pas des atomes, car ils peuvent être brisés par des actions chimiques, et ensuite ils peuvent être reconstruits; et il n'y a aucun doute qu'ils ne donnent naissance à une multitude de parties distinctes quand ils passent dans la nutrition, car les fibres musculaires, et celles des autres tissus, se composent de globules très-différens des globules du sang, et toujours beaucoup plus petits.

Enfin il y a des animaux complets qui sont aussi petits que les globules du sang et que les plus petites choses perceptibles. Nous pouvons les voir et les étudier : mais c'est le dernier terme où la vue puisse atteindre; ce qui est plus petit n'a plus de grandeur pour nos sens et n'a plus de mesure; c'est le commencement de l'indéfini en petitesse où se jette notre pensée, et qu'elle poursuit indéfiniment sans trouver un point où elle se doive arrêter.

Au delà de ce dernier terme de sensibilité organique, tout cependant n'est pas hypothèse et conjecture; ces animalcules sont des êtres et des êtres essentiellement composés de parties; ils sont organisés, puisqu'ils ont la vie et le mouvement; ils sont pourvus de sens, puisqu'ils ont la force et l'instinct. Dans les fluides où ils vivent, ils exécutent, comme les poissons, des mouvemens rapides et variés; ils se dirigent vers un but, ils évitent les obstacles, quelquefois même ils les surmontent; enfin ils ont besoin

d'une proie, et ils savent la chercher et la saisir. Nous verrons en optique que, dans les dernières classes des êtres visibles, les mœurs ne sont pas moins curieuses à observer que dans les classes les plus apparentes; mais dès à présent nous pouvons conclure que, dans le petit tout impalpable qui compose un individu de cette espèce, il y a des choses distinctes, des parties molles et des parties solides, des espèces d'articulations pour les mouvemens et des espèces de canaux pour les fluides; enfin que parmi cette excessive petitesse, il y a une nutrition dans toutes les parties et une circulation nécessaires. Ainsi, le raisonnement poursuit encore la divisibilité de la matière, après que nos sens ne peuvent plus la constater; et comme l'ensemble des phénomènes de la chimie nous conduit à admettre l'existence des atomes, nous arrivons à cette conséquence définitive, que les atomes sont incomparablement plus petits que les dernières parcelles que nous pouvons saisir avec le sens le plus délicat aidé de l'instrument le plus parfait.

10. *Porosité.* — On appelle *pores* les intervalles qui se trouvent entre les diverses parties des corps. Les espèces de trous qu'on observe dans l'éponge ne sont autre chose que des pores d'une grande dimension; les mailles plus serrées, qui composent son tissu, sont des pores un peu plus petits; enfin, il se trouve encore, entre ces mailles et entre les fibres qui les composent, des interstices qu'on appelle aussi des pores, bien qu'ils soient d'une telle finesse qu'ils échappent à la vue. Ainsi, quand nous concevons une éponge d'un certain volume, d'un décimètre cube par exemple, nous pouvons par la pensée pénétrer dans sa structure intérieure, et distinguer, dans cette étendue totale, l'espace qui est occupé par les diverses fibres de l'éponge, et l'espace très-irrégulier et très-sinueux qui reste inoccupé; nous devons même concevoir que chaque fibre, fût-elle fine comme un fil d'araignée, est elle-même composée de parties distinctes, et que ces parties sont encore séparées les

unes des autres, comme les fibres le sont entre elles.

Le volume, qui n'est occupé que par la substance propre d'un corps, est ce qu'on nomme le *volume réel :* l'espace apparent, qui est limité par sa forme extérieure, est ce que l'on nomme le *volume apparent.* Ainsi, le volume apparent diminué du volume réel est précisément le volume total de tous les pores pris ensemble. Quand on presse une éponge, son volume apparent se rapproche de plus en plus de son volume réel; mais jamais on ne peut la presser au point de ne laisser aucun intervalle entre ses parties. Ainsi le volume réel est une chose que nous concevons très-facilement, mais que nous ne pouvons jamais trouver : c'est pourquoi, quand nous parlons d'un volume, c'est toujours du volume apparent. Ce que nous disons de l'éponge s'applique à tous les corps, quelle que soit leur nature, car nous avons vu par la divisibilité que tous sont composés de parties séparables et par conséquent de parties qui sont distantes les unes des autres; ainsi dans la réalité tous les corps sont faits comme des éponges. L'acier et le diamant, qui sont les corps les plus durs; l'or et le platine, qui sont les corps les plus compactes, ont aussi un volume apparent; il faut de même pénétrer par la pensée dans l'intérieur de leur masse, et voir entre les atomes qui les composent, des intervalles qui sont incomparablement plus grands que les atomes eux-mêmes.

En considérant la porosité dans ce sens le plus étendu, il est rigoureux de dire, comme on le dit d'ordinaire, que tous les corps sont poreux; mais si l'on n'entend parler que de la porosité au travers de laquelle on peut faire passer des liquides ou des gaz, il n'est pas vrai que tous les corps soient poreux, car il y en a au travers desquels on ne peut faire passer aucun fluide, quelque subtil qu'il soit. C'est cette porosité qui donne passage aux corps étrangers, qu'il nous importe de connaître en ce moment, et nous allons faire voir par des exemples et par des expériences qu'il y a beau-

coup de corps, même des plus compactes, qui se laissent imbiber par les fluides.

Les tissus qui sont un produit de l'art, n'étant autre chose que des assemblages de fibres entrelacées, il n'est pas étonnant que ces fibres laissent entre elles des intervalles où puissent pénétrer les liquides, tels que l'eau, l'huile, l'alcool, etc. Aussi le papier, les feutres et les étoffes sont des corps dont tout le monde connaît la porosité. Il en est de même des corps réduits en poudre; il y a toujours, entre les fragmens, des intervalles où pénètrent les liquides; c'est pour cela qu'un monceau de sable est humide jusqu'à son sommet, et c'est aussi pour cela que le feu se conserve sous la cendre, car si l'air n'arrivait pas jusqu'au charbon, il s'éteindrait à l'instant.

Les filtres dont on se sert dans les opérations des arts et dans les expériences de chimie ne sont autre chose que des corps poreux, dont les pores sont assez grands pour laisser passer les liquides, et assez petits pour arrêter tous les corps étrangers qu'ils tiennent en suspension; c'est pour cela que les liquides filtrés sont parfaitement limpides : les filtres ordinaires sont le papier et le charbon.

Tous les tissus naturels, soit dans le règne végétal soit dans le règne animal, sont aussi très-poreux. Il n'est pas nécessaire de faire des expériences pour le prouver : il suffit de remarquer qu'une plante, un arbre ou un animal, n'était à son origine qu'un embryon d'un très-petit volume, car tous les germes sont petits; que ces corps se développent peu à peu, qu'ils vivent dans toutes les parties de l'intérieur, comme dans celles de l'extérieur, et qu'il faut bien que des fluides puissent circuler entre toutes les fibres pour y porter la nourriture et y entretenir la vie.

On peut dire qu'il y a des canaux particuliers pour cette circulation des fluides nutritifs et des autres fluides essentiels, et que dans la porosité des corps vivans il n'y a rien d'accidentel ni d'irrégulier. Sans doute, un animal ou un

arbre ne sont pas l'ouvrage du hasard; leurs parties matérielles ne sont pas entassées d'une manière confuse, comme les parcelles d'un monceau de sable. Mais ce n'est pas le hasard non plus qui a fait les minéraux et les montagnes; leurs parties matérielles ont aussi un certain ordre, et la porosité, dans un cas comme dans l'autre, résulte de l'arrangement nécessaire que les forces donnent à la matière.

Les corps organiques qui ont perdu la vie conservent encore cette disposition vasculaire; seulement les divers fluides, n'étant plus soumis aux forces particulières qui les dirigeaient, s'infiltrent indistinctement à travers tous les pores qui se présentent; tantôt ils s'exhalent, et le corps vivant se dessèche comme le bois, tantôt ils restent confondus et donnent naissance à une fermentation qui les détruit.

Le bois qui est plongé dans l'eau augmente de poids et de volume; celui qui reste dans l'air, soit dans les constructions, soit dans les ouvrages de menuiserie, se retire dans les temps secs et se gonfle dans les temps humides; tous ces effets résultent de sa porosité, qui est très-grande, et on ne peut y remédier que par des peintures ou des vernis.

Les animaux et les bois pétrifiés sont une preuve frappante de la porosité; puisque la substance qui les pétrifie doit s'infiltrer au travers de la masse et pénétrer toutes les fibres.

Les substances minérales sont plus ou moins poreuses, suivant leur nature et suivant l'arrangement de la matière qui les compose. Les pierres qui sont opaques et celles dont les parties sont très-irrégulièrement arrangées, sont en général les plus poreuses.

La craie et toutes les pierres qu'on nomme calcaires, sont de même nature que le marbre; il n'y a de différence entre elles que dans l'arrangement des parties, et cela suffit pour que leur porosité soit très-différente. Lorsqu'on verse

de l'eau sur un morceau de craie, elle est absorbée à l'instant et pénètre dans les pores; celle qu'on verse sur un morceau de marbre reste à sa surface et n'est point absorbée. De même si on jette un morceau de craie dans un verre d'eau, on voit une foule de petites bulles qui s'élèvent, et si on y jette un morceau de marbre, on n'aperçoit rien de semblable. Ces bulles proviennent de l'air qui remplissait les pores de la craie, et que l'eau en chasse à mesure qu'elle y pénètre. Si on en veut la preuve, il suffit de briser le morceau de craie qui a séjourné dans l'eau; on le trouve mouillé jusqu'au centre, tandis que le morceau de marbre est à peine mouillé au dessous de sa surface. Ce n'est pas que le marbre ne puisse aussi à la longue s'imbiber d'eau; mais pour faire passer les liquides dans les corps qui ne sont guère poreux, il faut en général deux conditions, beaucoup de temps et beaucoup de pression; c'est pourquoi les pierres qu'on tire du fond des rivières ou du fond de la mer sont en général très humides, surtout si elles viennent d'une grande profondeur; car nous verrons qu'à trois ou quatre mille mètres au dessous de la surface de l'eau les corps sont pressés par le poids supérieur du liquide, comme ils le seraient sous une très-forte presse.

Parmi les pierres siliceuses, comme les agathes et les pierres à fusil, il s'en trouve une qu'on appelle *hydrophane*, dont la porosité se manifeste par un singulier phénomène. L'expérience en est curieuse; l'hydrophane, dans son état ordinaire, est demi-transparente; on la plonge un instant dans l'eau, et quand on l'en retire elle est presque aussi transparente que le verre. L'eau a pénétré sa masse comme l'huile pénètre le papier; les bulles d'air qui se dégagent, comme dans l'expérience de la craie, montrent le progrès de l'absorption : leur volume total est égal à celui des pores accessibles à l'eau; mais si on veut avoir ce volume avec plus d'exactitude, il suffit de peser l'hydrophane avant et après l'opération : la différence des poids sera le poids

de l'eau absorbée, et il sera facile d'en conclure le volume.

Il y a beaucoup de phénomènes naturels par lesquels nous pouvons juger que les grandes masses minérales n'ont pas moins de porosité que les petites masses sur lesquelles nous pouvons expérimenter; on sait, par exemple, que dans les grottes les plus profondes, l'eau s'infiltre à travers les parois, et que c'est ainsi qu'elle vient déposer de toutes parts les stalactites, les stalagmites et toutes les autres cristallisations dont l'assemblage offre un spectacle si surprenant. On sait pareillement que les montagnes taillées à pic éprouvent chaque année une sorte d'exfoliation, dont la porosité est une des causes essentielles. Leurs flancs s'imbibent d'humidité, quand ils sont battus par la pluie ou par les vents humides, le froid de l'hiver congèle cette eau et augmente son volume; il en résulte une rupture d'adhérence dans toutes les couches superficielles, et quand vient le printemps, tous ces petits feuillets se détachent peu à peu et tombent jusqu'à l'automne. C'est ainsi qu'au pied des grands escarpemens, s'entassent des couches à peu près de même épaisseur, dont on peut se servir en géologie pour remonter aux temps primitifs où les montagnes ont pris la disposition qu'elles conservent aujourd'hui.

Enfin les métaux eux-mêmes donnent des preuves sensibles de porosité. Une boule d'or, remplie d'eau et soumise à une grande pression, laisse apercevoir, sur tous les points de sa surface, des gouttelettes semblables à celles de la rosée. Cette expérience fut faite, pour la première fois, en 1661, par les académiciens de Florence; elle a été depuis très souvent répétée avec des métaux différens, et toujours avec le même succès.

Il résulte de ces divers exemples de porosité, qu'un grand nombre de corps sont assez poreux pour se laisser pénétrer par les fluides, dès qu'ils sont en contact avec eux; qu'il y en a d'autres qui ne se laissent pénétrer qu'après un

temps plus ou moins long, et sous une pression plus ou moins forte; enfin, qu'il s'en trouve, comme le verre, qui se laisseraient briser plutôt que de se laisser pénétrer. Il est à peine nécessaire de faire remarquer que tous les fluides ne sont pas également subtils pour pénétrer les corps; l'eau, l'alcool, l'éther, les diverses solutions acides ou alcalines ou d'une autre nature, le mercure, l'huile, le soufre fondu, l'air et les différens gaz, ne peuvent pas s'insinuer avec la même facilité entre les interstices des corps. Il est très-heureux, pour les expériences, que le verre soit absolument imperméable à tous les fluides.

11. *Compressibilité.* — La compressibilité est la propriété qu'ont les corps de pouvoir être réduits à un moindre volume apparent.

On sait que les tissus très-poreux sont en même temps très-compressibles; l'éponge peut être réduite au tiers, au quart, ou même au dixième de son volume apparent. Le papier, les étoffes, le bois et tous les tissus qui se laissent pénétrer par les fluides peuvent pareillement diminuer de volume, et perdre par la compression les fluides qu'ils contiennent. Il y a une foule de procédés des arts qui ne sont que des applications de ce principe.

Les pierres elles-mêmes, quand elles sont chargées d'un grand poids, se laissent comprimer jusqu'à un certain point. Les bases les édifices et des colonnes qui en soutiennent la charge en donnent des preuves très-évidentes.

Les métaux sont *écrouis* par la percussion; ils deviennent plus compactes; leurs parties se refoulent les unes sur les autres, et forment une masse plus serrée.

Les monnaies et les médailles reçoivent leurs empreintes sous l'action d'un balancier qui les frappe d'un seul coup; cette pression est si forte qu'elle façonne le métal comme la pression de la main pourrait façonner la cire: et non seulement ils changent de forme, pour se mouler sur les traits les plus déliés de l'effigie que porte le coin, mais encore ils

se compriment de telle sorte, que la pièce frappée a sensiblement moins de volume que celle qui ne l'est pas.

Les liquides sont en général beaucoup moins compressibles que les solides : l'eau ne diminue que très-peu de volume, quand on l'enferme dans une pièce de canon dont les parois ont plus de trois pouces d'épaisseur, et qu'on la comprime par les plus fortes puissances. Le métal éclate avant qu'elle ne soit réduite aux $\frac{19}{20}$ de son volume. Car nous verrons dans l'un des livres suivans qu'elle ne se comprime que de $\frac{48}{1000000}$ pour chaque atmosphère, et qu'il ne faut pas mille atmosphères pour faire éclater un cylindre de bronze de trois pouces d'épaisseur.

L'air et les gaz sont de tous les corps ceux qui se compriment le plus facilement, et ceux qui se réduisent à un moindre volume. On peut le démontrer par un grand nombre d'expériences; mais l'une des plus simples est celle du briquet à air. Cet appareil se compose d'un tube de verre de huit ou dix pouces de longueur, et dont les parois sont très-épaisses (*Fig.* 1); dans son intérieur, qui est parfaitement cylindrique, se meut un piston qui le ferme exactement, dans toutes les positions qu'il peut prendre. Si le tube était rempli d'eau, le piston ne pourrait pas descendre, puisque l'eau est très-peu compressible; mais quand il est rempli d'air, la force de la main est suffisante pour enfoncer le piston et pour réduire le volume à la dixième ou même à la vingtième partie de ce qu'il était d'abord (*Fig.* 2). On sent que la résistance augmente à mesure que l'espace diminue, et qu'elle augmente de plus en plus; mais quelque effort que l'on puisse faire, on ne parviendrait jamais à pousser le piston jusqu'au fond, puisqu'il faudrait pour cela que l'air perdît son impénétrabilité, c'est-à-dire qu'il fût anéanti. Quand le piston reprend sa position primitive, l'air aussi reprend son volume primitif; ainsi il n'est pas compressible à la manière des métaux, qui reçoivent des empreintes, et qui ne reviennent pas à

leur volume primitif quand le balancier cesse de les presser.

Les autres gaz ont la même propriété que l'air, et tous ces corps ne sont pas seulement propres à être comprimés, mais en vertu de leur force expansive, ils sont propres à prendre un volume beaucoup plus grand.

Si au dessus du briquet à air on ajoutait un tube de même diamètre, et qu'au lieu d'enfoncer le piston on le soulevât dans ce nouveau tube (*Fig.* 5), l'air intérieur se répandrait partout, et prendrait un volume dix fois, cent fois, mille fois, etc., plus grand; et même il ne paraît pas qu'il y ait de limite à cette expansion des gaz. Après cela, on pourrait de nouveau enfoncer le piston, et le volume se réduirait de plus en plus; on pourrait le soulever de nouveau et le réduire encore, et ainsi de suite, sans que l'air conservât la moindre trace des divers états de compression ou d'expansion par lesquels on l'aurait fait passer. C'est une constitution très-remarquable, que celle de ces corps qui peuvent prendre ainsi un volume cent mille fois plus grand ou cent mille fois plus petit, sans qu'une action mutuelle entre leurs molécules cesse de s'exercer.

D'après cela, on pensera peut-être que tout l'air de l'atmosphère pourrait être enfermé dans un très-petit espace, comme par exemple dans la capacité d'une outre; mais nous verrons que, s'il n'y a pas de limite à l'expansion, il y a une limite nécessaire à la compression et à la réduction de volume.

12. *Elasticité.* — L'élasticité est la propriété qu'ont les corps de reprendre leur état primitif, quand on fait cesser la cause qui changeait leur forme ou leur volume.

L'air est parfaitement élastique : car si l'on presse une vessie à moitié pleine d'air, elle reprend toujours son état, dès qu'on cesse de la presser : pareillement, quand on a enfoncé le piston du briquet à air, il remonte de lui-même; l'air comprimé le soulève malgré le frottement, et le ra-

mène vers le point de départ. Il en est toujours ainsi quand une cause quelconque agit sur un gaz; dès qu'elle cesse d'agir, le gaz revient exactement comme il était auparavant. C'est pour cela que les gaz s'appellent des *fluides élastiques*.

Les liquides qui ont été comprimés paraissent ne rien conserver non plus des pressions qu'ils ont supportées; ils reprennent leur volume à l'instant même où cesse l'action des causes comprimantes.

Il n'y a pas de corps solide qui soit aussi parfaitement élastique que les gaz et les liquides. Le caoutchouc, ou gomme élastique, est peut-être de tous celui qui a le plus d'élasticité; et cependant, soit par la chaleur, soit par de grandes compressions long-temps prolongées ou souvent répétées, on finit par changer sa forme ou son volume.

Toute imparfaite qu'elle est, l'élasticité des solides n'en est pas moins une propriété très-importante et très-curieuse à observer; nous l'examinerons fort en détail dans l'un des livres suivans. Ici nous nous contenterons de faire voir, par quelques expériences, qu'elle se manifeste à divers degrés dans les différens corps.

L'élasticité de l'ivoire est assez indiquée par les mouvemens singuliers des billes de billard; mais on ne peut la montrer plus directement par une expérience ingénieuse. On laisse tomber une bille ordinaire, ou une bille grosse seulement comme une balle, sur un plan très-uni, où l'on a passé une légère couche d'huile; à l'instant elle se relève et rebondit jusqu'à la hauteur du point de départ, ou à très-peu près. C'est là sans doute une preuve suffisante de son élasticité, et, par conséquent, de son changement de forme; mais si l'on regarde sur le plan, au point où elle a frappé, on y voit une empreinte d'autant plus large que le choc a été plus vif, et qui prouve d'une manière certaine que la bille ne s'est relevée qu'après s'être aplatie, comme ferait une vessie pleine d'air, ou une bulle de savon; car ces bulles si légères peuvent aussi se réfléchir contre les

corps et rejaillir sans se rompre. Des balles de bois, de pierre, de verre ou de métal, se comportent à peu près comme les billes d'ivoire : toutes s'aplatissent plus ou moins avant de se relever, ce qui est une preuve de leur compressibilité; et toutes, quand elles n'ont pas été comprimées trop vivement, rebondissent et reprennent leur forme première, ce qui est une preuve de leur élasticité. Ainsi, dans le jeu des corps élastiques il y a un double phénomène, celui de la compression ou du changement de forme, et celui du rétablissement complet de toutes les parties. Une feuille de papier, ou même une feuille de plomb, ne sont pas des corps sans élasticité; car on peut leur donner de légères flexions, sans qu'elles se rompent et sans qu'elles cessent de reprendre leur position; mais si on les écarte un peu trop, leur élasticité est forcée, elles prennent le nouveau pli, et ne font plus d'effort pour en revenir.

L'élasticité résultant toujours d'un dérangement des molécules, soit qu'il ait lieu par pression ou par flexion, soit qu'il ait lieu par torsion ou par traction, l'on juge aisément qu'il y a, pour chaque corps, des limites à ces dérangemens, et, par conséquent, des limites à l'élasticité. Les corps sont d'autant plus élastiques que ces limites sont plus étendues; ainsi les billes d'ivoire sont plus élastiques que les balles de plomb, car elles reviennent d'une compression plus grande; les lames d'acier plus que celles de verre, car elles peuvent être bien plus fléchies; les fils de soie plus que ceux de cuivre ou d'argent, car ils peuvent être tordus bien davantage; et les cordes de violon plus que les fils de fer, car elles peuvent être bien plus étirées, sans cesser de revenir à leur première longueur. Mais si l'on ne fait éprouver aux molécules d'un corps que le dérangement que son état d'agrégation peut permettre, elles reviennent toujours très-exactement à leur position; et, dans ce sens, on pourrait dire que tous les corps, les solides même, ont une élasticité parfaite.

13. *Dilatabilité.*—La *dilatabilité* est la propriété qu'ont les corps de changer de volume par l'influence de la chaleur, de s'agrandir quand on les chauffe, de se contracter quand on les refroidit, et de reprendre exactement les mêmes dimensions quand on les ramène exactement au même degré de chaud ou de froid.

L'air se dilate si facilement que la simple chaleur de la main augmente de beaucoup son volume. Pour en faire l'expérience, on prend un tube de verre très-long, d'un diamètre intérieur de deux ou trois millimètres, et à l'extrémité duquel on a soufflé une boule. On peut, au moyen de certaines précautions, y faire entrer une colonne de liquide coloré, qui se tienne vers le milieu de la longueur du tube en *m m* (*fig.* 4), et sépare l'air intérieur de l'air extérieur. Cela fait, quand cette colonne est en repos, on approche la main près de la boule, et à l'instant on voit monter la colonne liquide; donc l'air intérieur augmente de volume. Ensuite, en retirant la main, on voit la colonne qui retombe peu à peu, et qui revient enfin à sa première position; ce qui prouve qu'en reprenant le même degré de chaleur, l'air reprend aussi le même volume.

Pour faire la même expérience sur les liquides, on prend un tube semblable au précédent, que l'on remplit d'eau ou de mercure jusqu'au milieu de sa longueur en *m* (*fig.* 5). Ensuite on chauffe la boule en la touchant avec la main, et la colonne monte de plus en plus jusqu'en $m'$; au contraire, si on la touche avec de la glace, la colonne tombe en $m''$; et elle retourne encore à sa position primitive quand la glace est éloignée.

Pour les solides, l'expérience peut se faire de plusieurs manières : une des plus simples consiste à prendre une barre de métal qui s'ajuste très-exactement entre deux talons, dressés à angle droit (*fig.* 6) sur une plaque métallique assez épaisse. Si l'on fait rougir la barre, elle devient trop longue pour reprendre sa place, mais elle revient sur

elle-même à mesure qu'elle se refroidit; et enfin quand elle n'a plus que la chaleur qu'elle avait d'abord, elle a repris sa longueur primitive, et retombe entre les points fixes.

Ainsi tous les corps sont dilatables; et de tout ce qui peut changer en eux, leur volume est la chose la plus changeante. A chaque instant du jour ou de la nuit la chaleur varie, soit par l'action du soleil, soit par une foule d'autres causes; et tous les corps qui sont à la surface de la terre participent à ces variations. Ils sont tour à tour plus dilatés ou plus contractés, et n'ont jamais les dimensions fixes que nous leur supposons. C'est par un mouvement de toutes les parties de l'intérieur et de l'extérieur que se produisent ces alternatives; et, si la porosité nous fait voir que ces parties ne se touchent pas, la dilatation nous fait voir maintenant qu'elles ne sont jamais en repos et qu'elles ne gardent jamais ni les mêmes distances ni les mêmes positions relatives. D'où nous pouvons conclure enfin que la matière qui nous semble la plus inerte a une activité perpétuelle dans toute l'étendue de sa masse, parce que toutes ses molécules, soit au dehors soit au dedans, sont soumises à des causes qui agissent sans cesse, et qui peuvent sans cesse éprouver des changemens d'intensité.

---

# CHAPITRE III.

## DE L'ÉQUILIBRE ET DU MOUVEMENT.

### *Notions de Statique.*

14. Un corps est en *équilibre*, quand les forces qui le sollicitent se détruisent l'une l'autre, ou quand elles sont détruites par quelque résistance. Ainsi un corps est en équilibre à l'extrémité du fil qui le suspend, parce que la pesanteur, qui le sollicite, est détruite par la résistance du fil et par celle du point de suspension; si le fil n'est pas assez résistant, il se rompt et le corps tombe; si le point d'attache est mal assuré, le corps l'entraîne et tombe avec lui. Quelquefois l'équilibre a lieu sans point fixe et sans résistance apparente : les poissons les plus pesans sont en équilibre dans l'eau; un ballon avec ses agrès, sa nacelle, et les observateurs qu'il emporte, peut aussi être en équilibre dans les airs : mais alors la pesanteur qui sollicite ces corps est exactement détruite par des pressions particulières, comme nous le verrons dans un des chapitres suivans.

On peut dire que tous les corps qui nous paraissent en repos, ne sont en effet que des corps en équilibre; parce qu'ils sont toujours soumis à l'action de plusieurs forces qui se détruisent l'une l'autre.

La *Statique* a pour objet de déterminer les conditions de l'équilibre; et la *Dynamique* a pour objet de déterminer les lois des mouvemens qui se produisent quand les conditions d'équilibre ne sont pas remplies. La *Mécanique* comprend la Statique et la Dynamique, c'est-à-dire les lois de l'équilibre et celles du mouvement.

15. On ne peut mesurer les forces qu'en prenant pour unité une force convenue, comme on mesure les longueurs ou les poids, en prenant pour unité une longueur ou un poids déterminés. De plus, la notion de grandeur ne s'appliquant pas directement aux forces, il faut définir avec précision ce qu'on appelle *forces égales*, *forces doubles*, etc.

Pour que deux forces soient égales, il faut qu'elles se fassent équilibre, lorsqu'on les oppose l'une à l'autre, sur un point, ou aux extrémités d'une droite inflexible. Deux forces égales donnent une force double quand on les ajoute, c'est-à-dire quand on les fait agir dans le même sens et dans la même direction; on aurait une force triple, si l'on faisait agir dans le même sens trois forces égales, et ainsi de suite.

D'après cela si l'on convient de représenter une force par un nombre ou par une ligne, la force double de celle-là sera représentée par un nombre double ou par une ligne double, etc. C'est ainsi que nous pouvons toujours représenter les forces par des grandeurs numériques ou linéaires, et faire sur elles les mêmes opérations que nous faisons sur ces grandeurs.

16. Quel que soit le nombre des forces qui agissent sur un point, et quelles que soient leurs directions, elles ne peuvent, en dernier résultat, imprimer à ce point qu'un seul mouvement, dans une direction déterminée. Or, on conçoit qu'il existe une certaine force qui serait, à elle seule, capable de produire le même effet; et cette force unique qui pourrait remplacer l'ensemble de toutes les autres, est ce qu'on appelle leur *résultante*. Ainsi, quand un bateau se meut à la fois par la force du courant, par la force des rames et par celle du vent, on peut concevoir une force unique, un fil assez fort, par exemple, qui, étant attaché au bateau, serait tiré dans une telle direction et avec un tel effort qu'à lui seul il lui imprimât à chaque instant le même mouvement que toutes ces forces réunies; il en serait la résultante. Le courant, le vent et les rames cessan

d'agir, et le fil dont nous parlons leur étant substitué, rien ne serait changé quant au résultat.

L'ensemble des forces qui concourent à produire un effet se nomme *un système* de forces; ces forces s'appellent aussi des *composantes*, quand on les considère par rapport à la *résultante* qui pourrait les remplacer. Il est évident que, si à un système de forces on ajoutait une force nouvelle, qui fût égale à la résultante et dirigée en sens contraire, l'équilibre aurait lieu dans ce nouveau système de forces. C'est là la propriété caractéristique de la résultante.

Ainsi, dans l'exemple que nous avons choisi, tandis que les forces du courant, du vent et des rames exercent leur action, si l'on ajoutait un fil assez résistant, dirigé en sens contraire de celui qui représente la résultante et tiré avec le même effort, cette nouvelle force produirait l'équilibre. Le bateau serait plus fixé que s'il était à l'ancre; il ne pourrait avancer ni reculer, ni se mouvoir d'aucun côté, jusqu'à ce qu'il arrivât quelque force nouvelle, ou quelque changement dans les forces agissantes pour déranger l'effort par lequel elles se détruisent.

17. *Résultante de plusieurs forces qui agissent dans la même direction.* — Quand toutes les forces qui agissent sur un point tendent à le mouvoir sur une même ligne, il peut se présenter deux cas : 1° Si toutes ces forces agissent dans le même sens, la résultante est égale à leur somme; 2° si elles agissent les unes dans un sens et les autres dans le sens opposé, la résultante est égale à la différence des deux résultantes partielles et agit dans le sens de la plus grande.

18. *Résultante de deux forces qui agissent angulairement sur un même point.* — Deux forces agissent sur le point A (*fig.* 7), l'une dans la direction AX, et l'autre dans la direction AY; la première est représentée en grandeur par AF, et la deuxième par AF′ : il est clair que le point A ne peut se mouvoir, ni suivant AF, ni suivant AF′, et qu'il doit prendre une direction intermédiaire. C'est ce que le

bon sens nous indique d'abord, mais c'est à peu près tout ce qu'il peut nous faire voir; car pour déterminer cette direction moyenne que doit prendre la résultante, et aussi l'intensité qu'elle doit avoir par rapport aux composantes, il faut recourir à des considérations que nous devons supprimer ici. Nous nous contenterons d'énoncer le principe général de la *composition des forces*, parce qu'il est très-simple et très-facile à comprendre. Voici en quoi il consiste. On construit le parallélogramme AFRF′ sur les grandeurs des deux forces données et l'on mène la diagonale AR; cette diagonale représente à la fois la *grandeur* et la *direction* de la résultante. Ainsi le point A, sollicité par les deux forces AF et AF′, est exactement dans le même cas que s'il était sollicité par une seule force, qui serait dirigée suivant AZ, et qui aurait une grandeur égale à AR. Ce principe est vrai, pour les forces égales comme pour les forces inégales; pour celles qui font un angle aigu droit ou obtus, comme pour celles qui font un angle quelconque. C'est le principe fondamental de toute la statique. Il est connu sous le nom de *parallélogramme des forces*.

Quand les deux forces sont égales, la résultante divise toujours leur angle en deux parties égales; mais pour sa grandeur, elle est tantôt égale à celle des composantes, tantôt plus grande et tantôt plus petite (*Fig.* 8, 9 et 10).

Quand les deux forces sont inégales, la résultante divise leur angle en deux parties inégales, et elle est toujours plus rapprochée de la force la plus grande (*Fig.* 11).

19. Puisque deux forces peuvent être remplacées par une seule, réciproquement une seule force peut être remplacée par deux autres. On voit même qu'il y a une infinité de systèmes différens qui peuvent donner lieu à la même résultante (*Fig.* 12), et que réciproquement il y aura une infinité de manières de remplacer une seule force par le système des deux autres, quand on n'exige rien ni sur leur grandeur ni sur leur direction. Mais si l'on demande

par exemple (*Fig.* 13) de remplacer la force AR par deux autres forces, dont l'une soit dirigée suivant AY, et soit d'une grandeur AF′, alors le problème est déterminé, parce qu'il n'y a plus qu'une manière d'achever le parallélogramme et de trouver la composante AF.

20. *Résultante d'un nombre quelconque de forces agissant au même point.* — Quand on sait trouver la résultante de deux forces qui agissent au même point, on trouve aisément la résultante d'un nombre quelconque de forces ; car on prend la résultante des deux premières, puis la résultante de cette résultante et de la troisième force, puis celle de cette nouvelle résultante et de la quatrième force, et ainsi de suite, en commençant à volonté par l'une ou par l'autre (*Fig.* 14).

21. *Résultante des forces parallèles.* — Quand deux forces parallèles AF et A′F′ (*Fig.* 15) agissent sur une ligne AA′, elles peuvent aussi être remplacées par une force unique qui est leur résultante, et dont on trouve l'intensité, la direction et le point d'application par les principes suivans :

1°. La résultante des deux forces parallèles est égale à leur somme quand elles agissent dans le même sens, et à leur différence quand elles agissent en sens contraire.

2°. Elle est parallèle aux composantes.

3°. Elle est appliquée en un point G, tel que les distances GA et GA′ soient en raison inverse des forces AF et A′F′. Ce point d'application de la résultante s'appelle le *centre des forces parallèles*. Une propriété remarquable de ce point, c'est qu'il reste le même quand les forces changent de direction absolue, en conservant leur parallélisme : car si les mêmes forces agissaient suivant $AF_1$ et suivant $A'F'_1$, leur résultante passerait encore par le point G, puisque les forces n'ayant point changé d'intensité, leurs grandeurs seraient encore en raison inverse des distances GA et GA′.

La résultante d'un nombre quelconque de forces parallèles se trouve en composant d'abord les deux premières, puis leur résultante avec la troisième, et ainsi de suite.

22. *Des Couples.* — Deux forces égales, parallèles et opposées forment ce qu'on appelle un *couple.* D'après ce que nous venons de dire, la résultante d'un couple est égale à *zéro*, et cependant le système n'est pas en équilibre; c'est un des cas très-particuliers où deux forces ne peuvent pas être remplacées par une seule. Un couple peut bien être transformé en un autre couple; on peut même le transformer d'une infinité de manières, mais jamais on ne peut le remplacer par une force unique; et par conséquent, pour un couple, il n'y a jamais de condition d'équilibre. Si on le laisse agir, il fait tourner la ligne AA′ (*Fig.* 16) jusqu'à ce qu'il se soit déployé dans la longueur FF′ (*Fig.* 17). Alors il n'y a plus de couple, et l'équilibre est stable. Si l'on avait reployé le couple dans la position marquée *Fig.* 18, il y aurait aussi équilibre, mais équilibre instable; car en le déployant un peu, il ferait tourner la ligne et se déploierait tout-à-fait.

25. *Levier.* — On appelle *levier* une barre droite ou courbe qui peut tourner autour d'un point fixe, qu'on appelle *point d'appui* (*Fig.* 19 et 20).

Un levier ne peut jamais être en équilibre sous l'action d'un seule force, à moins que le prolongement de cette force ne passe par le point fixe (*Fig.* 21 et 22).

Un levier étant sollicité par deux forces situées dans le même plan, il y a deux conditions pour qu'il reste en équilibre. *Il faut premièrement que ces forces tendent à faire tourner en sens contraire, et secondement que leurs intensités respectives soient en raison inverse de leurs bras de levier.* On appelle *bras de levier d'une force* la longueur de la perpendiculaire abaissée du point d'appui sur la direction de cette force, ou sur son prolongement; ainsi PQ (*Fig.* 25) est le bras de levier de la force AF, et PQ′

celui de la force A′F′. Ces deux forces étant supposées dans le même plan, on voit qu'elles tendent à faire tourner en sens contraires et qu'elles remplissent la première condition; mais pour qu'elles remplissent aussi la seconde, il faut *que la première force contienne la seconde, autant de fois que le bras du levier dans la seconde contient le bras de levier de la première.* Si, par exemple, AF est double de A′F′, il faudra que PQ′ soit double de PQ; si AF était mille fois A′F′, il faudrait que PQ′ fût mille fois PQ. Cependant il ne faudrait pas croire que PQ étant d'un mètre, par exemple, et PQ′ de mille, un homme qui tirerait suivant A′F′ pût faire équilibre à mille hommes de même force qui tireraient suivant AF; car en passant à la pratique, il se présente des résistances dont la théorie ne tient pas compte.

24. *Pression sur le point d'appui.* — Dans l'équilibre du levier, le point fixe supporte une certaine pression qu'il est utile de connaître. Pour cela, il suffit de transporter les forces au point de rencontre de leurs directions prolongées (*Fig.* 24), et de chercher leur résultante par la règle du parallélogramme des forces; cette résultante passe par le point d'appui, et exprime par conséquent la grandeur et la direction de la pression qu'il supporte. Si les forces étaient parallèles (*Fig.* 25), on sait, par ce que nous avons dit (21), que la résultante serait parallèle aux composantes et égale à leur somme.

25. Dans l'usage ordinaire, on emploie le levier à soulever des fardeaux; alors l'une des deux forces s'appelle *la résistance*; c'est le fardeau que l'on veut soulever : l'autre s'appelle *la puissance*; c'est la force quelconque qui est mise en jeu pour soulever le fardeau. Dans ce cas, la condition d'équilibre s'exprime en ces termes : *La puissance et la résistance sont en raison inverse de leurs bras de levier.*

On distingue aussi trois sortes de leviers, suivant les positions relatives du point d'appui et des points d'applica-

tion de la puissance et de la résistance. Dans *le levier du premier genre*, le point d'appui est entre la puissance et la résistance; la balance est un levier de cette espèce: dans celui du *deuxième genre*, la résistance est entre le point d'appui et la puissance : dans celui du *troisième genre*, c'est la puissance au contraire qui tombe entre la résistance et le point d'appui.

Nous renvoyons, pour de plus amples détails, à la Mécanique de M. Poisson et à la Statique de M. Poinsot.

26. *Mouvement uniforme.* — Le mouvement uniforme est celui dans lequel le mobile parcourt des espaces égaux en temps égaux. Ainsi, concevons un mobile qui parcourt une ligne droite, et une horloge qui mesure le temps; si, dans chaque minute, le mobile avance de la même longueur, de soixante pieds par exemple, et dans chaque demi-minute de trente pieds, de vingt dans chaque tiers de minute, il se mouvra d'un mouvement uniforme. Puisque les espaces sont égaux pour des temps égaux, il en résulte que le rapport de l'espace au temps est une quantité constante : c'est ce rapport qui s'appelle *la vitesse* du mouvement uniforme. Quand on prend un temps double ou triple, l'espace est double ou triple, et le rapport ne change pas. Le nombre qui représente la vitesse dépend des unités qu'on a choisies pour l'espace et pour le temps, et ce serait mal exprimer la vitesse que de l'exprimer par un nombre, sans désigner les unités qui ont servi à trouver ce nombre. Les mouvemens uniformes sont plus lents ou plus rapides suivant que leur vitesse est plus petite ou plus grande; le vent ordinaire ne parcourt que 60 mètres en une minute, le vent des orages parcourt jusqu'à 2700 mètres; ce dernier mouvement est 145 fois plus rapide que le premier.

27. Puisque la matière est inerte, un corps qui est animé d'un mouvement uniforme doit se mouvoir perpétuellement dans la même direction et avec la même

vitesse, à moins qu'une autre force ne vienne agir sur lui, soit pour changer sa direction seulement, soit pour changer à la fois sa direction et sa vitesse; car, de lui-même, un corps ne peut rien changer, ni à son état de repos ni à son état de mouvement. C'est ainsi qu'il faut entendre l'inertie, et non pas comme l'entendaient d'anciens philosophes, qui voulaient à toute force que la matière eût un penchant pour le repos. Ils comparaient les corps à des hommes paresseux: ceux-ci, disaient-ils, cherchent le repos, ils ont horreur du travail; de même, la matière a horreur du mouvement, elle se hâte d'entrer en repos dès qu'on cesse de la pousser. Ainsi, pour eux, l'inertie signifiait à peu près la même chose que paresse; mais on voit, d'après ce que nous avons dit, que trois choses essentielles constituent l'inertie: 1° la nécessité d'une force pour donner du mouvement à la matière; 2° la permanence du mouvement quand la force a cessé d'agir; 3° la nécessité d'une force nouvelle pour changer le mouvement qu'elle a reçu.

Lorsque nous voyons un mouvement qui diminue, qui cesse ou qui change d'une manière quelconque, nous pouvons être assurés qu'il y a quelques causes à ces changemens. Une pierre que nous lançons contre le soleil devrait aller jusqu'au soleil, si elle n'était arrêtée par la résistance de l'air et par la pesanteur qui la rappelle vers la terre. Une bille de billard, une fois mise en mouvement, roulerait d'une bande à l'autre sans jamais s'arrêter, si elle n'éprouvait aussi la résistance de l'air, et un frottement plus ou moins considérable sur les filamens du tapis.

28. La plupart des forces qui mettent les corps en mouvement, n'agissent d'une manière directe que sur un petit nombre des molécules qui composent les corps. Ainsi, quand on choque une bille de billard, on ne touche que quelques points de sa surface; quand le vent pousse

un vaisseau, il ne presse que les voiles; et quand la poudre lance un boulet, les gaz qui se développent et qui donnent l'impulsion ne touchent et ne pressent que son hémisphère intérieur. Cependant toutes les parties d'un corps se meuvent; aussi bien les parties sur lesquelles la force n'agit pas, que les parties qu'elle pousse directement. Il faut donc qu'il se fasse un partage du mouvement entre toutes les molécules, et un partage égal, afin qu'aucune ne prenne l'avance et qu'aucune ne reste en retard : celles qui sont directement choquées poussent les voisines, celles-ci les suivantes, et ainsi de proche en proche, jusqu'à ce qu'enfin toute la masse soit ébranlée et que toutes les parties se meuvent d'un commun mouvement. Pour passer d'une molécule à l'autre, et pour se répandre dans toute la masse, le mouvement exige un certain temps qui n'est pas très-grand, mais qui n'est pas non plus infiniment court; la durée de cette diffusion du mouvement est analogue à la durée qui est nécessaire pour qu'un fluide se répande dans un vase et s'y mette de niveau : elle dépend de la masse et de la nature du corps; c'est pourquoi il n'y a jamais de mouvement qui soit absolument instantané. Ce principe s'étend à toute matière, même à celle qui entre dans la composition des corps organiques : dans l'animal le plus vif, le mouvement n'est pas aussi rapide que la pensée, il faut un certain temps très-court pour qu'il prenne son essor et sa vitesse. Un oiseau peut voir la flèche qui vient le frapper, mais la flèche est plus rapide que les contractions musculaires, et n'eût-il qu'à tourner la tête pour éviter le coup, la tête est percée avant que le jeu des muscles ait produit son effet. Il y aurait de curieuses recherches à faire sur la rapidité de la contraction des divers organes dans les divers animaux.

29. *De la Quantité de mouvement.* — Quand une force agit sur un corps, quand le mouvement s'est répandu dans toutes les parties de la masse et que toutes se meuvent

d'une vitesse commune, tout est fini pour la force; elle a produit tout son effet, et l'on peut dire qu'elle est passée dans le mobile, qu'elle s'y est répandue, et qu'elle y reste comme si elle y était enfermée.

Ainsi, le projectile lancé par la main, par un ressort qui se débande, par un choc rapide ou par une explosion soudaine, s'en va, parcourant l'espace, pour obéir à la force qui a produit son effet, et qui, présentement, n'agit plus sur lui. Si ce projectile ne rencontrait rien, ni l'air, ni l'eau, ni aucun fluide, ni aucun corps en repos, ni aucun corps en mouvement, si, en outre, aucune autre puissance n'agissait sur lui, il s'en irait suivant la ligne de l'impulsion qu'il a premièrement reçue, et il la parcourrait d'un mouvement uniforme sans se dévier et sans s'arrêter; après un siècle, comme après une seconde, il aurait encore la même direction et la même vitesse. Cette permanence du mouvement est, comme nous l'avons vu, l'un des attributs de l'inertie; on peut l'exprimer en disant que l'action d'une force ne dure qu'un instant, et que l'effet qu'elle produit *se continue* éternellement.

C'est ainsi que le mobile conserve l'empreinte de la force à laquelle il a été soumis, et l'on conçoit que, la force restant la même, elle produirait des effets très-différens sur des mobiles différens. La charge de poudre qui lance une balle pourrait à peine soulever une bombe, et l'on sait bien que l'arc qui lance au loin une flèche légère ne pourrait pas lancer avec la même vitesse une flèche plus pesante. On entend dire assez généralement que cette différence dépend de la pesanteur; mais c'est une explication fort trompeuse, car elle semble indiquer que, si tous les corps cessaient d'être pesans, ils seraient tous projetés avec la même vitesse; ce qui est une grande erreur. Supposons pour un moment que les corps dont nous venons de parler cessent d'être pesans, supposons même qu'il n'y ait plus d'air qui s'oppose à leur mouvement : il arriverait encore

que la balle irait plus vite que la bombe, et que la flèche de bois serait aussi plus rapide que la flèche de fer; parce que la même force appliquée à des quantités de matière différentes imprime une vitesse d'autant moindre que la quantité de matière est plus grande. Voici sur ce point important un axiome qui est un principe essentiel de mécanique : *Quand une même force agit sur des mobiles différens, elle leur imprime des vitesses qui sont en raison inverse de leurs masses, ou de la quantité de matière qui les compose.* Ainsi la même force d'explosion qui lancerait successivement des balles de plomb dont les volumes, et par conséquent les quantités de matière seraient 1, 2, 3, 4, etc., ne leur imprimerait que des vitesses 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, etc., tellement que la balle dont la masse serait 10 ne recevrait qu'une vitesse $\frac{1}{10}$, celle dont la masse serait 100 ne recevrait qu'une vitesse cent fois plus petite, et ainsi de suite; d'où l'on voit que, pour chacune, la masse multipliée par la vitesse donne le même nombre; car, pour la première, ce produit est $1 \times 1 = 1$, pour la seconde $2 \times \frac{1}{2} = 1$, etc. C'est ce produit de la masse d'un mobile par sa vitesse qu'on appelle *quantité de mouvement.* Il suit de là qu'une même force d'impulsion donne toujours une même quantité de mouvement, quel que soit le projectile qu'elle pousse, et qu'ainsi la quantité de mouvement caractérise une force et devient sa véritable mesure.

On dit qu'une force d'impulsion est double, triple ou quadruple d'une autre, quand elle produit une quantité de mouvement qui est double, triple ou quadruple; d'où résultent ces trois conséquences :

1°. *Que les forces sont entre elles comme les quantités de mouvement qu'elles produisent, ou bien qu'elles sont entre elles comme les produits des masses par les vitesses;*

2°. *Que pour des masses égales, les forces sont entre elles comme les vitesses qu'elles impriment;*

3°. *Que pour des vitesses égales, les forces sont entre elles comme les masses sur lesquelles elles agissent.*

30. *De la Communication du mouvement.* — Quand un corps en mouvement rencontre un corps en repos ou un autre corps en mouvement, il se produit des effets très-curieux, qui dépendent de l'élasticité, de la dureté et de la masse relative des corps. Jusqu'à présent la science n'est parvenue à faire l'analyse de ces phénomènes qu'en supposant les corps parfaitement élastiques, ou en les supposant complètement dénués d'élasticité; hypothèses qui ne sont vraies ni l'une ni l'autre, mais d'où l'on déduit cependant quelques règles simples, qui sont très-utiles dans la pratique. Nous ne pouvons considérer ici que les corps sans élasticité, les singuliers phénomènes des corps élastiques devant être discutés en détail dans l'un des livres suivans.

1°. Quand deux masses égales, non élastiques, et animées de la même vitesse, viennent à se choquer *directement*, elles se pressent l'une l'autre, s'arrêtent tout à coup, et restent en repos dans le lieu même où le choc a eu lieu. C'est un principe évident de lui-même, car ces masses ne peuvent rejaillir, puisqu'elles manquent d'élasticité; et l'une ne peut entraîner l'autre et la pousser devant elle, puisque tout est égal dans les deux sens opposés. Ainsi, deux balles de plomb parfaitement égales, qui seraient lancées en même temps avec la même force, arrivant l'une contre l'autre avec la même vitesse, s'aplatiraient, parce qu'elles ne sont pas dures, et resteraient sans mouvement. Si elles tombent après le choc, ce n'est pas par un reste de vitesse qui n'aurait pas été détruit, mais bien par l'effet de la pesanteur qui agit sans cesse sur elles.

2°. Ce principe s'applique aux masses inégales, sous la seule condition que leurs quantités de mouvement soient égales entre elles, c'est-à-dire que, si l'une des masses est double de l'autre, il suffit que celle-ci ait une vitesse double pour être capable d'arrêter la première : une masse qui

serait cent fois plus petite devrait avoir une vitesse centuple pour produire le même effet, et ainsi de suite. Une balle de plomb d'une once arrêterait exactement un biscaïen d'une livre, si elle avait une vitesse seize fois plus grande que celle du biscaïen, et elle arrêterait un boulet de 48, si sa vitesse était sept cent soixante-huit fois plus grande que celle de ce boulet, puisqu'une once est la sept cent soixante-huitième partie de quarante-huit livres. Deux quantités de mouvement égales et contraires se détruisent exactement quand l'élasticité n'est pas en jeu, parce qu'en effet deux quantités de mouvement égales et contraires n'étant en réalité, comme nous l'avons vu, que deux forces égales et contraires, il faut bien qu'elles se détruisent.

3°. Quand les quantités de mouvement sont inégales, c'est la plus grande qui l'emporte; le mobile qui en est animé repousse devant lui l'autre mobile, il le force de rebrousser chemin, et à partir de cet instant ils se meuvent ensemble avec une vitesse qui leur est commune.

Alors la quantité de mouvement qui reste n'est que la différence des deux quantités de mouvement primitives; et comme elle est appliquée à la somme des deux masses, on voit que la vitesse restante n'est autre chose que cette différence des quantités de mouvement divisée par la somme de ces masses.

Si les mobiles allaient dans le même sens, les quantités de mouvement s'ajouteraient, et la vitesse commune, qui succéderait au choc, serait alors la somme des quantités de mouvement divisée par la somme des masses.

Ces conséquences s'appliquent au cas où un mobile rencontre un corps en repos; car pour avancer il est forcé de pousser devant lui ce corps en repos, et par conséquent de lui communiquer une telle quantité de mouvement qu'après le choc ils se meuvent ensemble d'une vitesse commune. Si la masse du corps en repos est égale à celle du mobile, il est clair qu'après le choc le mouvement sera également

partagé entre les deux masses, et la vitesse ne devra être que moitié, puisque la masse est devenue double; elle ne serait que le tiers de la vitesse primitive si la masse en repos était double de la masse du mobile; et l'on voit qu'en général, pour avoir le rapport de la vitesse qui a lieu après le choc à celle qui avait lieu avant le choc, il faut diviser la masse du mobile par la somme des masses du mobile et du corps en repos. Ainsi, une balle d'infanterie pesant $\frac{1}{20}$ de livre, et sa vitesse au sortir du canon étant de 1300 pieds par seconde, on voit que, si elle vient frapper un boulet de 48 qui soit en repos, elle le pousse devant elle; et leur vitesse commune est à la vitesse de 1300 pieds comme $\frac{1}{20}$ est à $48 + \frac{1}{20}$, ou comme 1 est à 961, c'est-à-dire qu'elle est $\frac{1300}{961}$, ou à peu près de 1 pied et $\frac{1}{3}$ par seconde.

Quand une balle vient frapper un grand bloc de pierre ou une montagne, elle doit aussi lui imprimer une certaine vitesse; seulement cette vitesse est très-petite : car le bloc de pierre pesant seulement cinq cents livres, la vitesse, après le choc, serait à 1300 pieds comme $\frac{1}{20}$ est à $500 + \frac{1}{20}$, ou comme 1 : 10001, c'est-à-dire qu'elle ne serait guère de plus d'un pouce par seconde; mais la résistance et le frottement ont bientôt détruit ce mouvement, qui se communique de proche en proche à tous les corps voisins, et même à la masse entière de la terre.

Ainsi, le mouvement se communique et ne se perd jamais : quand il semble s'éteindre, c'est qu'en réalité il sort du mobile pour passer dans les corps qui se trouvent sur son chemin; il se répand de proche en proche dans tous les corps qui sont contigus à ceux-ci, et il y devient insensible par la grande diffusion qu'il y éprouve. Il faut du mouvement pour détruire le mouvement; les résistances et les frottemens le dispersent et ne le détruisent jamais.

C'est d'après ces données que l'on mesure la vitesse des projectiles. On forme une espèce de pendule qu'on appelle *pendule balistique*, et qui se compose d'une grande masse de

bois ou de métal suspendue par une barre de fer (*Fig.* 26). La suspension de ce pendule pesant est ajustée pour qu'il oscille avec aussi peu de frottement qu'il est possible. On tire contre cette masse; le projectile y pénètre à une certaine profondeur, et partage avec elle tout le mouvement qui l'anime. La masse est poussée d'une certaine quantité, d'après laquelle on juge de la vitesse qu'elle a reçue; cette vitesse, multipliée par la somme des masses, donne la quantité de mouvement qui a lieu après le choc, et par conséquent celle qui avait lieu auparavant; il suffit donc de la diviser par le poids du mobile pour avoir la vitesse que possédait ce mobile au moment où il est venu frapper le pendule.

Il se présente dans la communication du mouvement des phénomènes singuliers qui dépendent de l'état d'agrégation des corps et de la rapidité avec laquelle le mouvement peut se transmettre de molécule en molécule dans l'intérieur d'une même masse. On sait, par exemple, qu'une balle traverse un carreau de vitre sans le rompre, et qu'elle y fait seulement un trou, comme ferait un emporte-pièce dans une feuille de métal. Cet effet ne dépend que de la vitesse de la balle, et non pas de sa forme; car si on la jette avec la main, elle casse le carreau tout aussi bien que le casserait une pierre. Mais dès qu'elle s'avance avec la rapidité que lui donne la poudre, les molécules qu'elle touche sont enlevées si vivement qu'elles n'ont pas le temps de transmettre sur les côtés le mouvement qu'elles reçoivent : tout se passe alors dans le cercle que frappe la balle; et le carreau tout entier, ne fût-il soutenu que par un fil de soie, n'éprouverait pas le moindre ébranlement.

C'est par la même raison que l'on a vu souvent un boulet de canon couper en deux le fusil d'un fantassin sans que celui-ci ressentît la moindre pression, à peu près comme avec une baguette on coupe une tête de pavot sans faire fléchir la tige. Pareillement on croyait que la bombe pourrait emporter avec elle une corde très-souple et très-tenace,

qui n'aurait qu'à se dérouler pour suivre le mouvement, et que de cette manière on pourrait sans danger porter un prompt secours à une grande distance, soit dans les naufrages ou les incendies, soit dans d'autres pressantes détresses; mais à l'expérience on n'a pu réaliser cet ingénieux projet; la corde casse, et ne suit point la bombe. Il faudrait un projectile dont la vitesse s'accrût assez lentement pour que l'adhésion des molécules pût résister aux secousses; car nous devons considérer la force d'adhésion, qui unit les molécules des corps, comme une sorte de lien immatériel qui ne peut supporter qu'un certain effort sans se rompre. Une molécule étant tirée, et l'autre étant en repos, le lien se brise si elle est tirée trop vivement; et, dans un temps donné, il ne peut passer ainsi d'une molécule à l'autre qu'une quantité de mouvement donnée.

Le mouvement produit par une explosion, soit par celle de la poudre, soit par celle de l'air ou de la vapeur comprimés, est un mouvement qui se communique essentiellement dans tous les sens. Les parois du canon empêchent l'expansion latérale, et tout l'effet se porte dans le sens de la longueur; mais là il se produit également dans les deux directions contraires, c'est-à-dire en avant pour pousser le projectile, et en arrière pour repousser la culasse, le canon et toutes les pièces qui en dépendent. Ces deux quantités de mouvement, qui sont toujours opposées, sont aussi toujours égales; de là vient le *recul*, qui accompagne inévitablement le départ du projectile. Si le fusil n'est pas repoussé contre l'épaule avec toute la vitesse de la balle, et si le canon et ses affûts ne reculent pas aussi vite que part le boulet, c'est seulement parce que les projectiles ont beaucoup moins de masse que les armes qui servent à les lancer. Quand un chasseur tire un coup de fusil, son épaule éprouve la même pression que si une balle venant du dehors entrait dans le canon, et en frappait le fond avec toute la vitesse de la balle qui sort.

On conçoit qu'il suffit de connaître le poids de l'arme, le poids du projectile et la vitesse du recul, pour en déduire la vitesse du projectile à son départ. C'est une méthode qui a été employée avec succès par Robins. Une circonstance digne de remarque, et qui est une autre preuve de la lenteur avec laquelle le mouvement se répand dans toute l'étendue d'une masse considérable, c'est que le recul ne commence à être sensible que quand le boulet est sorti du canon. L'expérience en fut faite pour la première fois à La Rochelle vers 1667, par les ordres du cardinal de Richelieu. On avait suspendu un canon à l'extrémité d'un grand levier mobile, et le boulet qui en sortait venait frapper le but, comme si le canon n'avait pu faire son recul que dans la direction même du mouvement du projectile.

La résistance des milieux n'est qu'un effet de la communication du mouvement. Quand un corps se meut dans l'eau, il est forcé d'écarter la couche qu'il rencontre, et tout le mouvement qu'il lui donne est autant de mouvement qu'il perd; puis, à mesure qu'il avance, il rencontre d'autres couches en repos, les écarte pareillement, et perd ainsi de nouvelles quantités de mouvement. Il en est de même pour tout autre milieu, tel que celui de l'air, d'un gaz ou d'un fluide quelconque. On admet dans tous ces phénomènes un principe général, savoir : que la *résistance d'un milieu* est proportionnelle au *carré de la vitesse* du corps qui le traverse, et voici la raison que l'on en donne : Quand la vitesse devient double, le corps parcourt une fois autant d'espace dans le même temps, et de là résulte, 1°. qu'il rencontre une fois autant de molécules auxquelles il donne du mouvement, ce qui lui fait déjà une perte double; 2°. comme il va une fois plus vite, il donne à ces molécules une fois autant de vitesse, ce qui double encore sa perte et la rend ainsi quatre fois plus grande. Donc, quand la vitesse devient 2, la perte devient 4, qui est le

carré de deux. On voit de même qu'avec une vitesse triple il rencontre trois fois autant de molécules, auxquelles il donne trois fois plus de vitesse, ce qui fait une perte neuf fois plus grande; et ainsi de suite. Pour des vitesses égales dans des milieux différens, les pertes dépendant de la quantité de matière que contiennent ces milieux, sous un volume donné, et de l'adhérence ou de la viscosité plus ou moins grande qui existe entre les molécules.

31. *De la force centrifuge.* — Concevons une petite boule sans pesanteur attachée à l'extrémité d'un fil extensible CM (*Fig.* 27), et supposons qu'on lui donne une impulsion pour la faire tourner autour du point C, comme la pierre d'une fronde tourne autour de la main. Il est clair que la boule décrira un cercle entier, puis un autre cercle, et ainsi de suite indéfiniment; s'il n'y avait pas de résistance, ce serait un mouvement perpétuel, et perpétuellement uniforme. La vitesse de ce mouvement circulaire est égale à l'espace divisé par le temps, comme celle du mouvement rectiligne. En même temps le fil éprouve une tension, car si on le coupe à un instant donné, la boule ne se mouvra plus en cercle, comme elle faisait auparavant; mais elle ira droit devant elle, en suivant la tangente sur laquelle elle se trouve. C'est la cause de cette tension du fil qu'on appelle *force centrifuge*, parce qu'en effet c'est l'effort que fait la boule pour fuir le centre, ou, ce qui revient au même, c'est l'effort qu'il faut faire pour la retenir et l'empêcher de s'en éloigner.

Quand la pierre d'une fronde tourne lentement, la corde est peu tendue; quand elle tourne vite, la corde se tend davantage; ainsi la force centrifuge est dépendante de la vitesse de rotation, elle croît et décroît avec elle dans un certain rapport. On démontre en mécanique que dans des cercles inégaux, qui sont décrits dans le même temps, les forces centrifuges sont proportionnelles aux rayons. Par exemple, CAB (*Fig.* 27) étant une roue horizontale ou verticale qui tourne autour de l'axe C, la force centrifuge du

point B sera double de celle du point A, si CB est double de CA.

Pour des cercles égaux, décrits dans des temps différens, les forces centrifuges sont en raison inverse des carrés des temps.

Si le mouvement n'était pas circulaire, s'il suivait une autre courbe quelconque, il n'y en aurait pas moins une force centrifuge; mais alors elle serait évaluée d'une autre manière. Dans tout mouvement curviligne la force centrifuge existe, et il faut toujours, pour l'empêcher d'avoir son effet, ou un fil qui retienne le mobile, ou une résistance qui l'empêche de s'éloigner, ou enfin une force attractive, qui agisse sans cesse sur lui et qui le presse vers le centre de rotation, autant que la force centrifuge le pousse à s'en écarter.

52. *Mouvement uniformément accéléré.*—On appelle *mouvement varié*, en général, le mouvement rectiligne ou curviligne dans lequel la vitesse change à chaque instant. Le mouvement est dit *accéléré*, si la vitesse va en augmentant, et *retardé*, si elle va en diminuant. On conçoit qu'il y a une infinité de mouvemens variés, car la vitesse d'un mobile peut changer en plus ou en moins d'une infinité de manières différentes. En général, dans les mouvemens variés de la nature, elle change suivant des lois assez simples pour qu'on puisse analyser toutes les circonstances que présente le mobile, pendant des temps très-considérables.

53. Dans le mouvement varié la vitesse n'est pas le rapport de l'espace au temps, comme dans le mouvement uniforme. Concevons un mobile qui se meuve d'un mouvement accéléré ou retardé, d'une manière quelconque; puisque son mouvement n'est pas uniforme, c'est qu'à chaque instant il y a une force nouvelle qui vient troubler l'uniformité, qui vient agir dans le sens même du mouvement pour en augmenter la vitesse, ou en sens contraire pour la diminuer. C'est là la cause nécessaire de la variation. Réci-

proquement, si, à une époque quelconque du mouvement varié, aucune force nouvelle ne venait agir sur le mobile, il est clair que toute variation cesserait à l'instant, et que le mobile continuerait de se mouvoir en ligne droite et d'un mouvement uniforme. Or la vitesse de ce mouvement uniforme qui succéderait ainsi au mouvement varié, si aucune force nouvelle ne survenait pour soutenir la variation, est précisément ce que l'on nomme la vitesse du mouvement varié.

Le mouvement *uniformément accéléré* est une espèce particulière de mouvement varié, c'est celui dans lequel la vitesse croît proportionnellement au temps; on peut le définir aussi en disant qu'il est le mouvement produit par une force *accélératrice constante*, c'est-à-dire par une force qui agit toujours sur le mobile, et qui a toujours la même direction et la même grandeur; car on démontre en mécanique qu'il n'y a que les forces de cette nature qui puissent imprimer au mobile des vitesses qui deviennent doubles, triples ou quadruples, quand les temps écoulés sont doubles, triples ou quadruples.

34. Toutes les lois du mouvement uniformément accéléré sont comprises dans les deux formules suivantes :

$$v = gt$$
$$e = \frac{gt^2}{2},$$

dans lesquelles $t$ est le temps qui s'est écoulé depuis le départ du mobile, $g$ la vitesse qu'il a acquise après une unité de temps, $v$ celle qu'il a acquise après le temps $t$, et $e$ l'espace total qu'il a parcouru dans le même temps. De ces quatre choses, deux étant connues, on peut trouver les deux autres. Nous en verrons de très-utiles applications en traitant de la pesanteur.

FIN DES NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

# LIVRE PREMIER.

## DE LA PESANTEUR.

### CHAPITRE PREMIER.

*Des effets de la pesanteur et de sa direction.*

35. Les corps tombent quand on les abandonne à eux-mêmes, et ils tombent jusqu'à ce qu'ils touchent la terre ou quelque autre corps qui les soutienne. Ce phénomène se produit à la surface du sol, comme on l'observe tous les jours; il se produit à de grandes hauteurs dans le ciel, comme on peut en juger par la grêle et la pluie qui tombent des nuages; et il se produit encore à de grandes profondeurs sous terre, comme on le voit dans les puits, dans les caves et dans les mines les plus profondes que l'on ait pu creuser : quand on voit des montagnes qui s'affaissent, c'est qu'elles manquent par leur base, qui sans doute est encore plus enfoncée que le fond des mines; elles *tombent* faute d'avoir un appui qui soit assez ferme pour les soutenir. Cependant la matière étant inerte, et ne pouvant d'elle-même ni prendre du mouvement, ni changer celui qu'elle a, il est clair que d'elle-même elle ne pourrait descendre vers la terre, puisque ce serait se donner du mouvement; il faut donc qu'il y ait une force qui la fasse tomber, et c'est cette force qu'on appelle *pesanteur*.

Ainsi la *pesanteur* est la force qui fait *tomber* les corps. Mais cette définition donnerait de la pesanteur une idée tout-à-fait incomplète, si l'on supposait qu'elle ne pût produire d'autre effet que faire *tomber* les corps. Il faut s'attendre à voir cette force produire encore beaucoup d'autres phéno-

mènes et beaucoup d'autres mouvemens qui sont désignés dans le langage usuel par des mots très-différens. Tels sont, par exemple, les mouvemens des liquides qui s'écoulent des vases, et le mouvement des fleuves qui coulent vers la mer; tels sont les mouvemens du liége et des corps légers qui s'élèvent du fond de l'eau à sa surface; tels sont encore les mouvemens de la fumée, des brouillards et des ballons qui s'élèvent dans les airs. Tous ces phénomènes, qui semblent si contradictoires, ne sont que des effets variés de la même force, que nous venons d'appeler pesanteur.

Pour embrasser dans toute son étendue l'étude d'une force aussi féconde en résultats, nous aurons donc à rechercher tous les phénomènes différens qu'elle peut produire, et à déterminer ensuite les lois des actions qu'elle exerce, suivant les lieux qu'occupent les corps, suivant les arrangemens de leurs parties, et l'espèce de matière qui les compose.

Nous voyons d'abord que la pesanteur agit sur presque tous les corps qui se présentent à nos observations, mais qu'elle agit sur eux pour les faire tomber avec des vitesses très-différentes. Les pierres et les métaux tombent très-vite, le bois et les autres substances végétales tombent plus lentement, et il existe des corps, comme les plumes, les duvets et les flocons de neige, qui semblent à peine pesans, car ils flottent dans les airs, et ne tombent qu'avec une grande lenteur. Il résulte déjà de ce premier aperçu que, si la pesanteur n'est pas une force universelle, c'est au moins une force très-générale; car il n'y a qu'un petit nombre de corps, comme la flamme et la fumée, qui semblent se soustraire à son action. C'est là du moins ce qui arrive en nos climats, et ce dont nous sommes témoins dès les premiers jours de notre enfance; mais la terre est si grande qu'il est curieux de savoir ce qui se passe en d'autres lieux, sur les mers éloignées, sur les îles ou sur les continens qui n'ont plus ni les mêmes saisons, ni la même posi-

tion par rapport à l'axe du monde. C'était aux voyageurs à nous l'apprendre, et les voyageurs nous assurent que, si d'un pays à l'autre on voit changer les hommes, l'aspect du ciel et les productions du sol, il y a toujours une chose qui, au milieu de tant de variations, n'éprouve point de changement; c'est la force de la pesanteur: partout elle agit de la même manière, soit au milieu des mers ou des continens, soit dans les régions des pôles ou dans celles de l'équateur. Que s'il se trouve quelques légères différences, elles ne sont pas sensibles dans les phénomènes ordinaires; et il est vrai de dire que non-seulement la pesanteur agit sur presque tous les corps, mais encore qu'elle agit à peu près de la même manière dans tout le vaste contour du globe de la terre.

36. *Direction de la Pesanteur.* —Pour déterminer la ligne suivant laquelle tombent les corps, on pourrait les suivre de l'œil et approcher une règle droite dont ils dussent raser le bord; mais il y a un meilleur moyen, qui est de fixer un fil par un bout et d'attacher à l'autre bout une petite balle un peu pesante. La direction du fil, quand il sera tendu et en repos, sera précisément la direction de la pesanteur; car si cette force agissait suivant une autre ligne, elle tirerait le fil et l'entraînerait suivant cette autre ligne. Ce petit instrument s'appelle un *fil à plomb* ou un *pendule*, et sa ligne de repos s'appelle *la verticale* (*Fig.* 29); ainsi la direction de la pesanteur est celle du fil à plomb ou de la verticale, et rien n'est plus facile que de la trouver à chaque instant dans tous les lieux de la terre.

Supposons qu'après avoir fait cette expérience hier, nous la recommençons aujourd'hui; nous serons fort embarrassés de savoir si le fil à plomb n'a pas changé dans l'intervalle. Il faudrait avoir quelques points fixes, où l'on pût rapporter ses directions, pour les comparer ensuite. Un édifice très-solide n'a pas assez de stabilité pour cet objet; car si après un certain temps, nous trouvions que le fil à

plomb n'est plus à la même ligne par rapport à ses murs ou à ses arêtes, nous serions encore très-embarrassés pour une conclusion; nous saurions bien que quelque chose est changé, mais nous ne saurions pas si c'est dans la direction de la pesanteur ou dans la stabilité de l'édifice. Les flancs ou les arêtes d'une montagne ne seraient pas des marques moins incertaines : car, sur la terre, une montagne aussi est une chose instable; il faut moins qu'un tremblement de terre pour l'ébranler sur sa base. Ainsi tout est mobile autour de nous, et nous n'avons pas un point fixe, ni sur les continens, ni sur les montagnes, pour juger si la pesanteur est constante ou si elle change à mesure que les siècles s'écoulent.

Heureusement nous avons un autre moyen : la surface de la mer, toute mobile qu'elle est, nous offre dans sa direction générale et dans ses limites, la plus grande stabilité que nous puissions observer sur la terre : car un changement de niveau, même très-petit, amenerait de grandes inondations et peut-être un déluge; or il arrive, non pas fortuitement, mais par une raison que nous verrons plus tard en hydrostatique, il arrive que la direction de la pesanteur est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles; donc si la pesanteur changeait, la mer changerait, et c'est par là seulement qu'on peut juger de la fixité de sa direction.

Au lieu de dire que la pesanteur est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles, on dit quelquefois qu'elle est perpendiculaire a la surface de la terre; et voici alors ce qu'on entend par la surface de la terre. Ce n'est pas, comme on le suppose bien, la surface apparente avec ses montagnes et ses vallées, mais c'est une surface idéale que l'on conçoit de la manière suivante : supposons que l'Océan atlantique, la mer du Sud et toutes les mers qui communiquent entre elles soient tranquilles pour un moment, leur immense plage formera une portion de surface à peu près sphérique, dont le contour sera déterminé par les sinuosités des rivages. Imaginons maintenant que les diverses parties de cette surface se pro-

longent en conservant leur courbure et en pénétrant sous les terres, et qu'elles se rejoignent de toutes parts au dessous des continens; elles formeront alors un globe complet parfaitement uni, n'ayant ni montagnes ni vallées. C'est cette surface, réelle en partie, et en partie idéale, qu'on appelle *surface de la terre*, *surface de niveau*, *surface horizontale*, car toutes ces expressions sont synonymes. Quand on dit que l'Observatoire de Paris est à 65 mètres au dessus de la surface de la mer, c'est comme si l'on disait que cette surface prolongée passe sous le premier étage de l'Observatoire, à une profondeur verticale de 65 mètres. Au contraire, il y a des plaines en Hollande qui sont au dessous de la mer, c'est-à-dire que la surface prolongée passe sur la tête des habitans.

La *surface de la terre*, telle que nous venons de la définir, pourrait, avec le temps, s'élever ou s'abaisser, s'éloigner ou se rapprocher du centre; mais si par quelque cause intérieure ou extérieure elle pouvait perdre sa forme, à l'instant la terre changerait son mouvement diurne, elle sortirait de l'orbite qu'elle parcourt depuis tant de siècles, et serait peut-être poussée dans quelque autre coin de l'univers. C'est ainsi que de la stabilité de la surface des eaux dépend de la stabilité de la terre et du monde.

La surface d'un lac, soit dans les plaines, soit dans les montagnes, est aussi une surface de niveau, c'est-à-dire que, si de ses rivages on abaissait des perpendiculaires sur la surface que nous venons de définir, elles y détermineraient une portion de surface qui serait semblable à celle du lac, et dont tous les points en seraient à la même distance. Il en est de même pour les surfaces des eaux tranquilles, soit au fond des puits, soit dans des vases de grandes dimensions; toutes ces surfaces sont horizontales, et toutes perpendiculaires à la direction de la pesanteur.

Il résulte de ces vérités fondamentales que toutes les directions de la pesanteur concourent vers le centre de la

terre; car toutes les perpendiculaires à une surface rigoureusement sphérique concourent à son centre. Ainsi ABPDX (*Fig.* 50), représentant la section de la terre qui serait faite par le méridien de Paris, et AX étant l'axe de rotation, il arrive, par les distances en latitude, que Paris se trouve en P, son horizon suivant PH, et son fil à plomb suivant PC; que Dunkerque est en D à une distance de 2° 11′ 56″, la ligne horizontale de Dunkerque en DH′, et son fil à plomb suivant DC; enfin que Barcelonne est en B, à 7° 28′ 29″ plus au midi, l'horizontale de Barcelonne en BH″, et son fil à plomb en BC.

Un observateur qui serait assez loin de la terre pour voir en même temps le fil à plomb de Paris et celui de Barcelonne, verrait qu'en effet ils sont inclinés l'un à l'autre de 7° 28′ 29″, et pourrait en conclure qu'ils concourent vers le centre de la terre. Quand on fait des expériences dans une petite étendue, comme dans un appartement ou même dans une grande ville, les fils à plomb semblent tout-à-fait parallèles, parce que le centre de la terre, qui est le point où ils tendent, est à une distance, d'environ 1432 lieues de 2280 toises, ou de 1632 lieues de poste de 2000 toises; or, 100 toises, par exemple, étant à peu près la trente-millième partie de cette distance; deux fils à plomb qui sont à 100 toises, ne font en effet qu'un angle de 6″, 3. Mais, puisqu'il en est ainsi, on ne comprend pas d'abord comment on peut mesurer l'angle des verticales de deux points; car, si ces points sont très-près, l'angle est si petit qu'il échappe aux mesures; et, s'ils sont très-loin, on ne peut plus voir en même temps ni les deux verticales, ni l'angle qu'elles font entre elles; toute mesure paraît donc impossible, et serait impossible en effet, si nous n'avions pas dans le ciel des points d'observation qui servent à nous guider. Les étoiles sont comme des jalons pour les habitans de la terre: c'est en les observant que nous pouvons mesurer nos angles et tracer nos alignemens. La distance du soleil à la terre

est de 35 millions de lieues, celle de la terre aux étoiles est 400 ou 500 mille fois 35 millions de lieues; ainsi, en quelque point de son orbite que soit la terre, et en quelque point de la surface de la terre que soit un observateur, les rayons visuels dirigés sur la même étoile sont des lignes toujours parallèles.

D'après cela, quand une étoile passe au méridien, et qu'on l'observe au même instant à Dunkerque et à Paris, les deux rayons DE et PE (*Fig.* 31) sont parallèles, mais les deux angles qu'ils font avec les verticales sont inégaux, et l'angle de Paris EPV est justement égal à l'angle de Dunkerque EDV', plus à l'angle PCD des deux verticales, qui est par conséquent la distance angulaire de Dunkerque à Paris.

Voilà donc comment se dirige la pesanteur tout autour de la terre, et voilà comment il est possible de comparer sa direction dans les différens lieux. Il y a une conséquence qui se présente naturellement : c'est qu'après avoir observé l'angle des verticales de Dunkerque et de Paris, après l'avoir trouvé de 2° 11' 56", on peut mesurer en toises ou en mètres la distance de ces deux villes; et connaissant ainsi la longueur de cet arc de 2° 11' 56", on peut en conclure la longueur de la circonférence de la terre tout entière et ensuite la valeur de son rayon, comme nous le verrons dans un des chapitres suivans.

---

## CHAPITRE II.

### *De la Chute des Corps et des Lois de la Pesanteur.*

57. En observant les mouvemens de différens corps qui tombent, la première chose qui nous frappe est la grande inégalité de leurs vitesses. Une balle de plomb tombe très-vite et une feuille d'arbre très-lentement; c'est un phénomène que tout le monde connaît, mais qui ne résulte pas, comme on le dit communément, de ce que la balle est très-lourde et la feuille très-légère. Car une feuille d'or battu ou une feuille d'étain, quand elles sont bien étalées, tombent aussi très-lentement; tandis qu'elles tombent beaucoup plus vite si on les roule pour en faire de petites masses arrondies. Alors c'est le même poids, et on ne peut plus dire que c'est la différence des poids qui fait la différence des vitesses. Cette expérience est suffisante pour un observateur attentif : il en conclura bientôt que c'est l'air qui emporte les feuilles et qui les retarde dans leur chute, et que si l'air agit ainsi sur de grandes surfaces, il agit sans doute, quoique avec moins de force, sur des surfaces qui lui offrent moins de prise.

Pour trouver le vrai mouvement des corps pesans, il faudrait donc les faire tomber dans un lieu où il n'y eût point d'air, et par conséquent point de résistance qui pût combattre la pesanteur. Un espace où il n'y a ni air, ni liquide, ni autre matière résistante, est, comme nous l'avons vu (2), ce qu'on appelle le *vide*. Un tel espace n'existe pas naturellement; mais nous pouvons l'obtenir au moyen de la machine pneumatique : ainsi nous pouvons déterminer la véritable loi de la chute des corps.

On en fait l'expérience de la manière suivante : on prend un tube de verre de huit ou dix pieds de long, fermé par un bout, et muni à l'autre bout d'un robinet de forme ordinaire, capable de *tenir le vide.* Par l'ouverture du robinet, on fait passer dans le tube des morceaux de plomb, du papier, des plumes, ou tout autre corps sur lequel on veut faire l'expérience. On fait le vide avec beaucoup de soin, et on ferme le robinet. Alors, en tournant promptement le tube, pour le mettre dans la verticale, on voit tous ces corps qui tombent librement dans son intérieur et qui viennent tous au même instant en frapper le fond.

On peut modifier cette expérience de manière à rendre sensible le progrès du phénomène. On entr'ouvre un peu le robinet et on le ferme presque aussitôt; alors un peu d'air est rentré, car on en a entendu le sifflement; et en retournant le tube comme la première fois, on observe un peu de différence dans le temps de la chute, la plume et le papier sont en retard sur le plomb. Un peu plus d'air rend le retard un peu plus long, et ainsi progressivement : tant qu'à la fin, l'air étant complètement rentré, la chute se fait dans le tube comme elle se fait à l'air libre.

Ainsi, quand la pesanteur agit seule sur les corps, quand elle n'est combattue par aucune résistance qui gêne les mouvemens qu'elle leur imprime, elle agit sur tous également et avec la même énergie, quel que soit leur poids, et quelle que soit la substance qui les compose. Dans le vide, une masse d'or de cent livres ne tomberait pas plus vite qu'une parcelle d'or en feuilles, ni plus vite qu'un morceau de papier; une montagne ne tomberait pas plus vite qu'une plume.

38. Après avoir montré que, dans la réalité, tous les corps tombent avec la même vitesse, il faut chercher quelle est cette vitesse commune qui règle la chute de toute espèce de matière, et, en général, quel rapport il existe entre l'espace que parcourt un corps pesant et le

temps qu'il emploie à le parcourir. Ce rapport sera la loi de la pesanteur, c'est-à-dire la loi du mouvement que la pesanteur imprime à la matière.

Cette question semblerait assez facile à résoudre si l'on pouvait avoir un tube vide d'une centaine de pieds de longueur. Il suffirait de le placer verticalement, de laisser partir de son sommet un corps quelconque à un instant donné, et de marquer le point où il passe après une seconde, après deux secondes, etc. Mais on observerait bientôt ce que l'on peut observer aussi dans l'air, c'est qu'au commencement de leur chute les corps tombent très-lentement, puis leur vitesse augmente de plus en plus, et en peu d'instans elle est tellement accélérée qu'on ne pourrait plus noter le point où passe un corps, tant il passe rapidement. Une balle qui tombe d'un peu haut vient frapper la terre avec un mouvement très-vif, et une pierre qui tombe d'un édifice élevé prend assez de vitesse pour briser ce qu'elle rencontre ou pour se briser elle-même. Une chute aussi accélérée échappe à l'observation directe, et la loi de la pesanteur semble impossible à trouver; cependant on y parvient par quelques moyens ingénieux : par le plan incliné de Galilée, et mieux encore par la machine d'Atwood.

59. *Plan incliné de Galilée.* — Ce qu'on appelle plan incliné de Galilée n'est, à vrai dire, qu'une ligne inclinée, sur laquelle on fait rouler un mobile ; c'est une corde très-unie, de vingt ou trente pieds de long, que l'on tend entre deux points fixes, dont l'un est plus bas que l'autre, et sur laquelle on fait rouler un petit char, ou plutôt une poulie de métal convenablement disposée. La pesanteur de la poulie serait complètement détruite si la corde était horizontale; elle aurait toute sa force, si elle était verticale; et, comme la corde a un certain degré d'inclinaison, la pesanteur de la poulie est réduite dans une certaine proportion facile à trouver par le calcul et qui est exprimée par sa valeur primitive multipliée par le sinus de l'inclinaison de la corde

sur l'horizon. Mais, quel que soit le rapport dans lequel on diminue une force, qu'on la réduise à la moitié, au tiers ou au quart de sa grandeur, on ne change que le mouvement absolu qu'elle imprime, sans rien changer au rapport des espaces parcourus dans des temps donnés. Ainsi, la loi que nous allons observer sur cette corde inclinée sera la vraie loi de la pesanteur. Or, si on laisse couler le char à un instant donné, qu'on note les espaces qu'il parcourt dans la première seconde, dans les deux premières secondes, etc., on trouve que ces espaces parcourus sont entre eux comme les carrés des temps employés à les parcourir. Donc le mouvement que la pesanteur imprime suit la même loi; c'est-à-dire que la pesanteur est une force accélératrice constante (34).

40. Cette vérité fondamentale, et tous les caractères des forces accélératrices constantes, se démontrent d'une manière plus claire et plus rigoureuse par la *machine d'Atwood*. Cet appareil est représenté (*fig.* 32). Mais pour la simplicité du raisonnement nous le réduirons à ses élémens essentiels, c'est-à-dire à une poulie parfaitement mobile, sur laquelle passe un fil très-fin, qui est tiré à chaque extrémité par le même poids $m$ (*Fig.* 33). L'équilibre existe quand les deux poids sont au même niveau; et il existe encore, quand l'un est plus haut et l'autre plus bas, comme il est facile de le vérifier par l'expérience. Maintenant, ajoutons d'un côté une petite masse que nous représenterons par $\mu$ : il est clair que l'équilibre est troublé, que le poids $\mu$ entraîne le poids sur lequel il repose, et qu'il le force à descendre, tandis que l'autre, il le force à monter.

Mais quel est le mouvement qui en résulte? est-il le même que si le poids $\mu$ tombait librement, ou bien est-il modifié par les poids opposés qui se meuvent avec lui?

Les deux masses primitives n'ayant de mouvement que celui que leur donne la masse $\mu$, il est évident que celle-ci

ne peut leur en donner qu'à ses dépens, qu'elle perd tout ce qu'elle donne, et qu'ainsi elle tombe moins vite qu'elle ne tomberait si elle était seule. De plus, il est facile de trouver de combien sa chute est ralentie.

Soit $g$ la vitesse qui serait due à la pesanteur après une seconde de temps; la masse $\mu$, si elle était libre, aurait donc au bout d'une seconde cette même vitesse $g$, et par conséquent une quantité de mouvement $g\mu$.

Soit $x$ la vitesse inconnue que prennent en une seconde les masses $m$ et $\mu$ en tombant ensemble; la quantité de mouvement du système sera $x\,(2\,m+\mu)$, puisque la masse qui se meut est d'une part $m$ et de l'autre $m+\mu$, dont la somme fait $2\,m+\mu$. Or, dans une seconde, la masse $\mu$ reçoit de la pesanteur la même quantité de mouvement, soit qu'elle tombe d'une chute libre, soit qu'elle tombe d'une chute retardée par d'autres masses. Donc

$$x\,(2\,m+\mu)=g\mu,\text{ d'où } x=g.\frac{\mu}{2\,m+\mu}.$$

C'est, dans la machine d'Atwood, la vitesse du corps qui tombe. Elle est toujours plus petite que $g$, et peut en être une aussi petite fraction qu'on voudra. Si l'on veut, par exemple, qu'elle en soit un centième, il suffit de poser

$$\frac{\mu}{2\,m+\mu}=\frac{1}{100},\text{ d'où } 100\,\mu=2\,m+\mu,\text{ et } \mu=\frac{m}{49,5};$$

c'est à-dire qu'à chaque instant la vitesse, dans la machine, d'Atwood, est la centième partie de la vitesse due à la chute libre, quand la masse additionnelle est la 49,5 partie d'une des masses primitives. En prenant, par exemple, $\mu=10$ gr. et $m=495$ gr., la condition sera remplie.

Il y a un grand avantage à réduire ainsi la vitesse des corps qui tombent, puisque alors les espaces parcourus peuvent être mesurés plus exactement, et la résistance de

l'air complètement négligée. Cette réduction de la vitesse est le vrai principe de la machine d'Atwood. Voici maintenant sa disposition :

1°. Pour éviter le frottement, on fait poser chaque extrémité de l'axe de la poulie sur deux autres poulies plus petites, dont les axes roulent sur des plans d'agate (*Figure* 34).

2°. Pour mesurer les espaces avec exactitude, on dispose près de la colonne une règle verticale et divisée, que la masse $m+\mu$ doit suivre dans sa chute, sans la toucher. Sur cette règle se meuvent deux curseurs : l'un A, en forme d'anneau, pour laisser passer la masse $m$ et pour arrêter la masse $\mu$, que l'on fait un peu plus longue ; l'autre C, en forme de plan, pour recevoir la masse $m$ et l'arrêter où l'on veut.

3°. Pour compter le temps pendant lequel le mobile s'est mu, on adapte auprès de la machine une horloge à secondes, et on la fait communiquer à une détente particulière qui soutient la masse $m+\mu$ vis-à-vis le sommet de la règle, où se trouve le *zéro* de sa division. A un instant donné, la détente part, le poids tombe, et l'horloge continue de marquer le temps qui s'écoule.

On fait les expériences de la manière suivante : On place l'anneau de la règle à une hauteur telle, qu'il arrête la masse $\mu$ après une seconde de chute depuis l'instant du départ. Pour cela, on l'élève et on l'abaisse peu à peu, jusqu'à ce que le bruit de la masse $\mu$, au moment où elle le frappe, coïncide juste avec le battement de l'horloge qui marque la fin de la seconde. Quant $\mu$ est arrêtée, tout le mouvement ne s'arrête pas; car les masses $m$ ont une *vitesse acquise*, en vertu de laquelle elles continuent à se mouvoir ; seulement la pesanteur n'agit plus pour changer leur mouvement ; $\mu$ étant enlevée, la force accélératrice est enlevée, et le mouvement qui succède est un mouvement uniforme. Or, d'après ce que nous avons dit (33) la vitesse

de ce mouvement uniforme est précisément celle du mouvement accéléré qui avait lieu à la fin de la première seconde, et pour la trouver il suffit de placer le curseur C de telle sorte que $m$ vienne le frapper juste une seconde après que $\mu$ est ôtée, c'est-à-dire deux secondes après le départ de $\mu$. Alors la distance des deux curseurs A et C est l'espace que $m$ a parcouru en une seconde en vertu du mouvement uniforme; c'est donc la vitesse de ce mouvement et aussi la vitesse du mouvement accéléré. On fait une deuxième expérience en n'ôtant la masse $\mu$ qu'après deux secondes; on en fait une troisième en ne l'ôtant qu'après trois secondes, et l'on a ainsi la vitesse du mouvement accéléré après une, deux, et trois secondes. On trouve exactement que ces vitesses sont entre elles comme 1, 2, 3; donc elles croissent proportionnellement au temps; donc le mouvement dont il s'agit est uniformément accéléré.

Ce résultat suffirait pour conclure que l'espace parcouru, en vertu du mouvement uniformément accéléré pendant un certain temps, est moitié de l'espace parcouru dans le même temps par le mouvement uniforme qui lui succède. Mais on le voit directement; car, dans chacune des expériences précédentes, la distance des curseurs est double de la distance de l'anneau au point de départ.

Pareillement on pourrait en conclure par le calcul que les espaces sont comme les carrés des temps; mais il est facile d'imaginer comment on peut le démontrer aussi par le moyen de la machine.

Ces expériences s'accordent avec celle de Galilée, pour prouver que la pesanteur, qui s'exerce à la surface de la terre, est une force accélératrice constante. Déjà la chute dans le vide a fait voir qu'elle s'exerce également sur toute espèce de corps. Ainsi, toutes les molécules matérielles, quelle que soit leur forme ou leur nature, sont constamment soumises à l'action de cette force.

D'après cela, les lois du mouvement qu'elle imprime sont

exprimées par les formules générales du mouvement uniformément accéléré (34),

$$v = gt$$

$$e = \frac{gt^2}{2},$$

dans lesquelles il reste à mettre pour $g$ la valeur qui convient à la pesanteur. On se rappelle que $g$ représente les vitesses que la force accélératrice imprime au mobile pendant l'unité de temps, et l'on se rappelle aussi que cette vitesse est double de l'espace que la force fait parcourir pendant la même unité; ainsi $g$ est un espace ou une longueur. Nous indiquerons plus tard un moyen très-exact d'en trouver la mesure, et nous verrons qu'en prenant la seconde pour unité de temps, la valeur de $g$ est à Paris

$$g = 9^{m},8088.$$

Avec cette donnée on peut s'exercer à résoudre plusieurs problèmes sur le mouvement des corps pesans.

1°. Un corps tombe pendant cent secondes : quelle vitesse a-t-il à la fin de sa chute, et quel est l'espace qu'il parcourt ?

2°. Un corps a parcouru mille mètres dans sa chute : pendant combien de temps est-il tombé ?

3°. Quel est l'espace qu'un corps parcourt depuis la vingtième jusqu'à la trente-septième seconde de sa chute ?

4°. On donne au mobile une impulsion verticale de haut en bas, qui lui imprimerait un mouvement uniforme, dont la vitesse, exprimée en mètres, serait de $a$ en une seconde; quel est l'espace qu'il parcourt en vertu de cette impulsion et de la force de la pesanteur ?

C'est un principe de mécanique, que, quand deux forces sollicitent un mobile dans le même sens, sa vitesse est la somme des vitesses, et l'espace qu'il parcourt la somme des espaces dus à chaque force.

Ainsi, après le temps $t$, sa vitesse sera $v = gt + a$ et l'espace $e = \frac{gt^2}{2} + at$.

5°. On donne au mobile une impulsion verticale de bas en haut, qui lui imprimerait un mouvement uniforme dont la vitesse serait de $a$ mètres en une seconde; à quelle hauteur arrivera-t-il avant de s'arrêter, et quelle vitesse aura-t-il en revenant au point de départ?

Il résulte du principe précédent que les vitesses et les espaces se retranchent, quand les forces agissent en sens contraire. Ainsi les équations du mouvement sont ici :

$$v = a - gt$$
$$e = at - \frac{gt^2}{2}$$

$gt$ va croissant avec le temps; ainsi la vitesse $v$ décroît sans cesse, elle sera nulle quand on aura $a = gt$, ou quand il sera écoulé un temps égal à $\frac{a}{g}$. Alors l'espace parcouru sera, en mettant pour $t$ cette valeur dans la seconde équation, $e = \frac{a^2}{g} - g\frac{a^2}{2g^2} = \frac{a^2}{g} - \frac{a^2}{2g} = \frac{a^2}{2g}$. C'est la hauteur que le mobile peut atteindre. Arrivé là, il retombe de sa chute naturelle avec des vitesses toujours croissantes. Revenu enfin au point de départ, il aura parcouru l'espace $\frac{a^2}{2g}$; ainsi il aura employé un temps donné par l'équation $\frac{a^2}{2g} = \frac{gt^2}{2}$, c'est-à-dire un temps $t = \frac{a}{g}$; c'est justement le temps qu'il avait mis à monter; il aura donc à cet instant une vitesse $v = g.\frac{a}{g}$, ou $v = a$; c'est la vitesse qu'il avait en partant.

Ainsi, un mobile pesant, lancé verticalement, ne met pas plus de temps à monter jusqu'au point où il s'arrête qu'il n'en met à redescendre naturellement de ce point au point de départ; et la vitesse qu'il acquiert en revenant est la même qu'il avait en allant.

---

## CHAPITRE III.

*Du Centre de Gravité. — De l'Équilibre des Solides. — De la Balance. — Du Poids, de la Masse, et de la Densité des Corps.*

41. Un corps pesant, quelque grand ou quelque petit qu'il soit, peut être considéré comme un assemblage d'un nombre infini de points matériels, dont chacun est sollicité par la pesanteur.

Toutes ces forces, quoique en nombre infini, pourraient être remplacées par une force unique, appliquée en un certain point; c'est cette force, qui ne serait autre chose que la résultante de toutes les actions de la pesanteur, que l'on appelle *le poids* d'un corps, et c'est le point où elle devrait être appliquée qu'on appelle son *centre de gravite.*

Cette définition suffit pour qu'on ne confonde pas la *pesanteur* avec le *poids*, puisque la pesanteur est la force élémentaire qui sollicite chacune des parcelles de la matière en général, et que le poids d'un corps est la somme ou plutôt la résultante de toutes les actions que la pesanteur exerce sur ce corps en particulier.

Il est très-important de savoir déterminer le poids des corps et leur centre de gravité, puisque alors on pourra substituer le poids, qui est une seule force, à toutes les forces élémentaires qui agissent sur un corps, et le centre de gravité, qui est un seul point, à l'ensemble des points qui le constituent; et qu'ainsi une masse pesante, quelles que soient sa grandeur et sa forme, pourra être considérée comme un seul point sollicité par une seule force.

42. *Du Centre de Gravité.* — Dans un corps pesant, qui n'a pas quelques centaines de toises d'étendue, les actions

que la pesanteur exerce sur chaque molécule peuvent être prises pour parallèles, puisqu'elles vont concourir au centre de la terre, et elles sont toutes égales, puisque ces molécules tombent également vite dans le vide; ainsi le *centre de gravité* n'est autre chose qu'un *centre de forces parallèles et égales.* De là résulte une propriété caractérisque du centre de gravité, c'est que ce point est fixe dans l'intérieur des corps solides, et ne change pas, quelle que soit la position qu'on leur donne à l'égard de la pesanteur. Par exemple, le point G (*Fig.* 35) étant le centre de gravité du corps ABC quand le point C est en haut, il sera encore le lieu du centre de gravité quand le point C sera en bas, ou dans toute autre position qu'on pourrait lui donner; car le point d'application de la résultante des forces parallèles est indépendant de la direction de ces forces (21).

Pour qu'un corps pesant soit en équilibre, il n'y a qu'une seule condition essentielle à remplir; c'est que le centre de gravité soit soutenu. Par conséquent, si le eentre de gravité est lui-même un point fixe, on pourra tourner le corps de toutes les manières possibles, il restera toujours en repos, parce qu'il sera toujours en équilibre. On en peut faire l'expérience avec une poulie homogène, tournant autour d'un axe horizontal, qui passe par le centre. Lorsqu'un corps est soutenu par un point fixe qui n'est pas le eentre de gravité, l'équilibre est encore possible, mais il n'a plus lieu que dans deux positions seulement, savoir : quand le centre de gravité est dans la verticale du point fixe, soit au dessus, soit au dessous de ce point. On en peut faire l'expérience avec une poulie homogène tournant d'un axe horizontal et excentrique.

C'est de cette considération que l'on tire un moyen expérimental de trouver le centre de gravité d'un corps. On l'attache avec un fil en un point C de sa surfaee (*Fig.* 36), on le suspend, et, quand il est en repos, on marque avec autant d'exactitude qu'il est possible, le point *m* où le pro-

longement du fil viendrait percer la surface inférieur; le centre de gravité est nécessairement sur la ligne C$m$. Ensuite on recommence l'expérience en attachant le corps par un autre point A, et en marquant de même le point $m'$ correspondant; le centre de gravité est aussi dans la ligne A$m'$. Donc il se trouve à la rencontre des deux lignes C$m$ et A$m'$.

Pour des corps très-lourds, on pourrait faire l'expérience en sens contraire, en les tournant sur leurs arètes ou en les posant sur des supports de petite étendue. Mais, pour les corps homogènes qui ont des formes régulières, on détermine leur centre de gravité par des considérations géométriques assez simples.

*Ligne droite.* — Le centre de gravité est évidemment au milieu de la longueur.

*Cylindre à bases parallèles.* — Le centre de gravité est dans l'axe, puisque c'est une ligne autour de laquelle tout est symétrique; il est aussi dans la section perpendiculaire qui couperait le cylindre en deux parties égales; donc il est au milieu de l'axe en G (*Fig.* 37). Il en est de même d'un cylindre creux (*Fig.* 38); et pour un cylindre en partie plein et en partie creux (*Fig.* 39), il n'est pas difficile de voir comment on le pourrait trouver.

*Parallélogramme.* — Le centre de gravité est à la rencontre des diagonales; car chaque diagonale coupe la figure en deux parties égales. Il en est de même pour un parallélogramme creux, comme un cadre.

*Cercle.* — Le centre de gravité est au centre du cercle, ce point est pareillement le centre de gravité de la circonférence et celui de l'anneau compris entre deux circonférences concentriques (*Fig.* 40).

*Triangle.* — On mène les lignes $de$, $fg$, etc., parallèlement à la base (*Fig.* 41), ensuite la ligne A$m$ qui coupe en deux parties égales cette base et toutes ses parallèles; on achève les parallélogrammes $d$BC$e$, $hbci$, etc., par des lignes parallèles à A$m$. La ligne A$m$ passe par le centre de

gravité de tous les parallélogrammes extérieurs, et aussi par les centres de gravité de tous les parallélogrammes intérieurs au triangle; et elle y passe, quelle que soit la grandeur que l'on donne à ces parallélogrammes. Or, comme ils sont, les uns circonscrits au triangle, les autres inscrits, et comme à leur limite de petitesse ils finissent par se confondre avec lui, il faut bien aussi que le centre de gravité du triangle soit sur A$m$; pareillement il doit être sur B$m$ (*Fig.* 42.), donc il est en G à leur rencontre; et il résulte des triangles semblables ABG et $m$G$m'$ que $m$G est la moitié de AG, ou que le point G est aux deux tiers de A$m$, à partir du point A.

*Polygones.* — On les décompose en triangles (*Fig.* 43), dont on cherche les centres de gravité; ensuite on regarde les forces appliquées aux centres de gravité des triangles comme étant proportionnelles à leurs surfaces, on en cherche la résultante par les règles ordinaires, et son point d'application est le centre de gravité.

*Pyramide triangulaire.* — On mène une ligne du sommet S (*Fig.* 44) au point G, centre de gravité de la base AAC; et on démontre aisément, en faisant des tranches inscrites et circonscrites, comme pour les triangles, que le centre de gravité est sur cette ligne SG; qu'il est pareillement sur SG', et qu'ainsi il est en G'' à leur rencontre. Ensuite on conclut, par la comparaison des triangles semblables, que ce point G'' est aux trois quarts de SG, à partir du sommet. Une pyramide quelconque se décompose en pyramides triangulaires, et on arrive à cette conséquence, que, dans tous les cas, le centre de gravité d'une pyramide est sur la ligne qui joint son sommet au centre de gravité de sa base, et qu'il est aux trois quarts de cette ligne, à partir du sommet.

*Polyèdre.* — On le décompose en pyramides, comme le polygone se décompose en triangles.

*Cône.* — C'est comme une pyramide.

*Sphère.* — Le centre de gravité est au centre de la sphère ; de même pour une surface sphérique ; de même pour une couche comprise entre deux sphères concentriques.

43. *De l'Equilibre.* — Nous avons déjà vu que la seule condition d'équilibre d'un corps pesant est que son centre de gravité soit soutenu ; mais cette condition se remplit de diverses manières, suivant que le corps est suspendu à des points fixes, ou posé sur des appuis.

Si l'aiguille AC ( *Fig.* 45 ) pouvait se mouvoir librement autour de son axe sur le cadran vertical MTSN, il faudrait, pour que son centre de gravité G fût soutenu, qu'il se trouvât dans le plan vertical passant par l'axe. Il n'y peut être que de deux manières, ou en G′ au dessous de l'axe, ou en G au dessus ; ce qui ne donne que deux positions d'équilibre. Dans le premier cas, on dit que l'équilibre est *stable*, parce qu'en écartant l'aiguille d'un côté ou de l'autre de sa position, elle tend à y revenir et finit par la reprendre. Au contraire, dans le second cas, on dit que l'équilibre est *instable* ; parce que l'aiguille, pour peu qu'elle en fût écartée, ferait la bascule, et n'y reviendrait jamais. Ce résultat est général ; il y a toujours *stabilité*, quand le centre de gravité est *au dessous* de l'axe, et *instabilité*, quand il est *au dessus*. Entre ces deux positions il n'y point d'équilibre possible, et si l'aiguille est retenue par son frottement contre l'axe, alors c'est l'axe lui-même qui est entraîné, comme il arrive dans les horloges, et qui l'est d'autant plus que le centre de gravité est plus loin de la verticale. Ainsi avec une aiguille un peu pesante, dont le centre de gravité serait loin de l'axe, une horloge devrait avancer de midi à six heures et retarder de six heures à midi.

Un corps qui est posé sur un plan horizontal et qui ne le touche que par un point, peut prendre aussi diverses positions d'équilibre : les unes sont stables, et les autres instables, comme dans l'exemple précédent : et il y en a d'autres

enfin qu'on appelle *indifférentes*, parce que le corps, quand on l'en écarte un peu, ne fait aucun effort pour y revenir, ni pour s'en écarter davantage ; il reste dans la position qu'on lui donne. Si du centre de gravité d'un corps on mène des rayons à tous les points de sa surface, la plupart de ces rayons sont obliques à cette surface, au point où ils aboutissent ; mais il y en a toujours un certain nombre qui lui sont perpendiculaires, et cela, quelle que soit la forme extérieure du corps; en effet, il y a toujours un rayon *maximum* entre tous, ou *maximum absolu*, et un rayon *minimum absolu*, en général; il y a même d'autres rayons qui sont maximum ou minimum entre leurs voisins, et tous ces rayons sont essentiellement des normales à la surface, puisqu'ils coïncident avec les rayons des sphères osculatrices. Or il est évident que, si le corps touche le plan horizontal par l'extrémité d'un de ces rayons normaux, le centre de gravité est dans la verticale du point de contact, et l'équilibre existe. Au contraire, si le corps touche le plan par l'extrémité d'un rayon oblique, le centre de gravité n'est plus soutenu, puisqu'il n'est plus dans la verticale du point de contact.

Si le rayon normal du point de contact n'est ni maximum ni minimum, mais seulement égal à ses voisins, l'équilibre n'est ni stable ni instable, il est indifférent. C'est ce qui arrive à une sphère homogène posée sur un plan horizontal ; elle est en équilibre dans toutes les positions, et par conséquent en équilibre indifférent. Si le rayon normal du point de contact est maximum, l'équilibre est instable ; c'est le cas d'un œuf posé sur sa pointe, ou d'un ellipsoïde posé sur l'extrémité de son grand axe. Si le rayon normal du point de contact est le rayon minimum absolu, l'équilibre est stable, et a la plus grande stabilité qu'il puisse prendre ; c'est le cas d'un ellipsoïde de révolution autour de son petit axe, et posé sur l'extrémité même de ce petit axe. Enfin, si le rayon normal du point de con-

tact est seulement minimum entre ses voisins, l'équilibre ne sera stable que dans l'étendue des points pour lesquels le minimum a lieu; et si le rayon est, dans un sens, égal à ses voisins, tandis qu'il est dans les autres sens un maximum ou un minimum, l'équilibre est indifférent dans le premier sens, et stable ou instable dans les autres sens. C'est le cas d'un œuf posé par le côté, ou d'un ellipsoïde de révolution autour du petit axe ou du grand axe. On peut facilement imaginer diverses expériences qui rendent ces considérations plus familières.

Quand un corps est posé sur un plan par deux points, il faut que la verticale abaissée du centre de gravité tombe sur la ligne qui joint ces points, et dans l'intervalle qui est compris entre eux. Ainsi dans les voitures à deux roues, la verticale du centre de gravité doit tomber entre les roues et sur la ligne qui joint leur point de contact avec le sol. Si elle tombe en avant ou en arrière, la voiture est trop chargée de l'avant ou de l'arrière; et, comme ces voitures peuvent rouler sur des plans inclinés, où elles sont retenues par le frottement, il faut, pour qu'elles ne versent pas, que la verticale du centre de gravité ne tombe pas hors de la ligne du point de contact des roues; ce qui est d'autant plus difficile, que les roues sont plus élevées, et que la charge occupe un plus grand volume.

Quand un corps est posé sur une base plus ou moins étendue, l'équilibre n'a lieu que quand la verticale du centre de gravité tombe dans l'enceinte de la base. On conçoit qu'il importe peu que cette base soit ou ne soit pas continue; quand elle ne l'est pas, on achève son enceinte en menant des tangentes aux points extrêmes (*Fig.* 46). Plus l'enceinte a d'étendue, et plus le centre de gravité peut être déplacé, sans que le corps cesse d'être soutenu.

Tous les jeux d'équilibre dont on amuse les curieux roulent sur la dextérité avec laquelle on maintient la verticale du centre de gravité sur une base très-étroite. Tantôt la base

est fixe, et n'a d'étendue que quelques pouces de la longueur d'une corde assez mince, et alors il faut faire jouer le balancier pour ramener dans cet espace la verticale du centre de gravité; tantôt cette base est mobile, et il faut la faire mouvoir assez adroitement pour qu'elle se trouve sans cesse sous le centre de gravité, comme dans l'équilibre d'une canne ou d'une épée qu'on soutient sur la pointe du doigt; tantôt les deux difficultés se rencontrent à la fois, et c'est alors que le danseur de corde montre tout son talent. Mais les applications véritablement utiles des conditions de l'équilibre sont celles qui se présentent à chaque instant dans les arts. Ceux qui ne les observent pas soigneusement dans le dessin, par exemple, et dans la sculpture, sont exposés à faire des figures qui tombent, ou des statues qui ont besoin des broches qui les traversent pour se tenir debout.

44. Les conditions d'équilibre, telles qu'on les donne habituellement et telles que nous venons de les établir, ne sont réellement suffisantes que dans les spéculations de la théorie, car elles supposent à la matière une propriété dont elle ne jouit pas; elles supposent que tous les corps sont parfaitement rigides, c'est-à-dire qu'ils ne sont ni élastiques, ni compressibles, et que leurs molécules ont à l'égard l'une de l'autre une immobilité absolue. En effet, concevons une barre de fer d'un pouce carré de section et parfaitement homogène, qui soit posée par son milieu sur un appui quelconque (*Fig.* 47); son centre de gravité sera soutenu, et cependant l'équilibre n'aura pas lieu, car elle fléchira en vertu de son élasticité, et si elle est assez longue, elle pourra fléchir au point de se rompre. Il en est de même dans tous les cas que la nature nous présente; partout il faut tenir compte de l'élasticité de la matière et de sa ténacité. Ce qui est vrai du fer et des corps inorganiques l'est à plus forte raison des corps organisés, qui sont bien moins tenaces et bien plus élastiques. Un arbre est soutenu, parce que la verticale de son centre de gravité tombe dans

la vaste enceinte qui est déterminée par les racines; mais cela n'empêche pas que les rameaux ne fléchissent par leur propre pesanteur, et que la tige elle-même ne puisse fléchir et se rompre par la même cause. Un éléphant est soutenu, parce que la verticale de son centre de gravité tombe dans l'enceinte des quatre colonnes qui supportent sa masse; mais il faut, en outre, que les vertèbres et les côtes soient assez fortement articulées pour porter un tel poids, et que les muscles et la peau puissent résister à la pression qu'ils en éprouvent.

On comprend pareillement que les changemens de forme qui résultent, soit de l'élasticité, soit de la compressibilité, soit des mouvemens volontaires qui déplacent les membres et les organes, sont autant de causes qui font varier le centre de gravité. Quand un homme lève le bras, son centre de gravité change de place; quand un oiseau allonge le cou, son centre de gravité est très-sensiblement porté en avant. On voit (*Fig.* 48) les quatre positions du centre de gravité d'un oiseau dans les quatre situations principales de la marche, du repos, de la nage et du vol.

45. *De la Balance.* — La balance se compose essentiellement d'un fléau A $m$ B (*Fig.* 49), dont les deux parties $m$ A et $m$ B s'appellent les bras de la balance, et de deux pièces mobiles adaptées aux extrémités du fléau que l'on appelle les plateaux ou les bassins. Le fléau est soutenu vers son milieu sur un pied solide, et il porte une longue aiguille perpendiculaire qui tombe au *zéro* de sa division quand le fléau est horizontal, et qui passe à gauche ou à droite, suivant que le fléau se relève lui-même à gauche ou à droite. On met dans l'un des bassins le corps que l'on veut peser, et dans l'autre des poids marqués; on en met jusqu'à ce que le fléau soit horizontal, ou du moins jusqu'à ce que l'aiguille fasse des oscillations égales de part et d'autre de son zéro. Alors la somme des poids est prise pour le poids du corps. C'est ainsi que l'on pèse ordinairement

quand on n'a besoin d'aucune exactitude, et quand on veut être à peu près sûr de se tromper; mais ce n'est pas ainsi que l'on pèse en physique et en chimie. Il faut deux choses pour arriver à quelque exactitude; il faut une grande perfection dans la balance et une grande habileté à s'en servir.

Pour qu'une balance soit bonne, il faut : 1° que le fléau n'éprouve sur ses supports que le moindre frottement possible, et cette condition se remplit de la manière suivante : CC est un prisme d'acier qui traverse le fléau F, comme on le voit (*Fig.* 50), et qui est taillé, comme on le voit, par sa section perpendiculaire, qui est représentée en S. L'arête *a* est un tranchant un peu arrondi, et c'est ce tranchant, qu'on appelle le couteau, qui porte toute la masse du fléau, de l'aiguille, des bassins et des poids qu'ils contiennent : car il repose sur deux pièces d'agate ou d'acier PP qui sont incrustées dans le pied de la balance, de manière que leurs surfaces ne forment qu'un même plan horizontal.

2°. Il faut que la distance du point d'attache des bassins au point de suspension du fléau soit très-exactement la même dans toutes les positions que prend l'appareil avant de s'arrêter à l'équilibre; car si ces distances pouvaient changer, les poids qui sont dans les bassins agiraient par des leviers variables, et produiraient des différences dont on ne pourrait plus tenir compte (*Fig.* 49) : ce serait comme si on suspendait le fléau tantôt par un point, tantôt par un autre, ou comme si on attachait les bassins tantôt à une moindre, tantôt à une plus grande distance du centre. On remplit cette condition en ajustant les pièces, pour que les bassins ne touchent le fléau que comme le fléau lui-même touche ses appuis, c'est-à-dire par des arêtes légèrement arrondies, très-dures et très-polies (*Fig.* 51). *f* représente l'extrémité du fléau; *cc* est un petit prisme d'acier dont l'arête tranchante est en haut, comme on le voit par la section *s*, et *hh* sont deux crochets dont les courbures *rr* sont aussi tail-

lées en couteau, pour qu'en se posant sur l'arête *cc* il n'y ait qu'un point de contact de chaque côté, et que ce point reste le même dans toutes les oscillations du fléau.

3°. Il faut que le centre de gravité du fléau soit convenablement placé pour que l'équilibre soit stable, et pour que les oscillations ne soient ni trop lentes ni trop rapides. Si le centre de gravité était en G (*Fig.* 52) au dessus de l'axe de suspension, l'équilibre serait instable, et la balance serait folle. S'il était en G (*Fig.* 53) sur l'axe de suspension lui-même, l'équilibre serait indifférent, et la balance n'oscillerait pas. Dans une position inclinée, le fléau serait aussi bien en équilibre que dans la position verticale. Enfin, si le centre de gravité est en G (*Fig.* 54) au dessous de l'axe de suspension, l'équilibre est stable, d'après ce que nous avons vu (34). Quand le fléau penche à droite, le centre de gravité sort à gauche de la verticale du point de suspension; il tend à y revenir, et y revient en effet par une suite d'oscillations dont la rapidité est plus ou moins grande.

4°. Pour que le couteau ne fatigue pas les plans sur lesquels il repose, il y a deux fourchettes qui montent et qui descendent pour le soulever ou pour le mettre en place. Quand on ne se sert pas de la balance, on lève les fourchettes par un mouvement de manivelle (*Fig.* 55), et le fléau repose sur elles; quand on veut s'en servir, on abaisse doucement les fourchettes, et le couteau vient reposer sur ses plans. Ce mécanisme sert aussi dans chaque pesée pour arrêter les oscillations du fléau.

On pourrait bien demander, pour dernière condition d'exactitude, qu'il y eût une égalité parfaite entre les deux bras de la balance, c'est-à-dire entre la distance du couteau central aux deux couteaux extrêmes qui portent les bassins; mais il est très-difficile que cette condition soit remplie, et le plus sûr est de supposer qu'elle ne l'est pas. Borda nous a dispensé d'exiger des artistes ce dernier degré de perfection, en imaginant une méthode ingénieuse qu'on appelle

*la méthode des doubles pesées.* On met dans un des bassins le corps qu'on veut peser; dans l'autre, on met des poids non marqués, comme de la grenaille de plomb et des fragmens de clinquant, pour compléter l'équilibre; alors on lève les fourchettes, on ôte le corps, ou tout à la fois, ou par partie, et à sa place on met des poids marqués jusqu'à rétablir l'équilibre exactement : la somme de ces poids est le vrai poids du corps, puisqu'ils produisent le même effet que lui pour équilibrer ce qui est dans l'autre bassin. Avec de bonnes balances, telles que celles de M. Fortin, il ne faudra plus pour peser exactement qu'une dextérité qui s'acquiert par l'habitude. Les balances construites pour peser jusqu'à un kilogramme trébuchent à un milligramme. Un milligramme n'est qu'une parcelle de métal; mais c'est cependant un poids assez sensible; c'est plus que le poids d'une mouche. Les balances qui ne sont faites que pour aller à quelques grammes sont beaucoup plus délicates, et trébuchent aux fractions de milligrammes.

45. *Du Poids, de la Masse, et de la Densité.* — Il importe, pour les relations civiles et commerciales, que les poids marqués dont on se sert soient partout les mêmes, ou du moins qu'ils aient partout un rapport connu et invariable avec un poids déterminé pris pour unité. Il importe pour la science que l'unité de poids ne puisse pas se perdre, et que l'on puisse dans tous les temps en vérifier l'exactitude, pour comparer les résultats d'une époque à ceux d'une autre époque, et en déduire des connaissances nécessaires sur les lois de la pesanteur et des conséquences utiles pour les recherches statistiques.

L'unité de poids, qui a été adoptée en France dans ces derniers temps, est le *gramme*, qui est le poids d'un centimètre cube d'eau distillée prise au maximum de condensation. Si la longueur du centimètre se perdait, on pourrait la retrouver, puisqu'elle est la centième partie du mètre; et si le mètre lui-même venait à se perdre, on pourrait le

retrouver aussi, puisqu'il est la dix-millionième partie de l'arc du méridien de Paris, compris entre le pôle et l'équateur; il suffirait de recommencer la mesure de la terre. Enfin, si la terre elle-même venait à changer de forme ou de grandeur, alors le mètre serait changé; on ne pourrait plus en retrouver la longueur : mais en même temps tout serait changé pour nous; les jours et les nuits n'auraient plus les mêmes périodes, ni les saisons le même cours et la même durée; l'unité de poids serait elle-même altérée : et elle le serait encore si l'eau pouvait changer de composition, ou si la pesanteur pouvait changer d'action. Ainsi, tout est conditionnel dans nos principes les plus fondamentaux, et la science a fait tout ce qu'elle pouvait faire quand elle a établi ses bases sur la stabilité du monde.

On dit communément que la *masse* d'un corps est la quantité de matière qui le compose; mais cette définition serait tout-à-fait illusoire, si nous n'avions pas quelque moyen de comparer les quantités de matière et d'établir leur rapport. Nous savons bien que dans l'espace d'un pied cube nous pouvons faire entrer des quantités de fer très-différentes; car le fer peut se comprimer, s'écrouir, et se réduire à un moindre volume. Il en est de même de tous les corps, et surtout de l'air. Tout le monde sait que dans l'espace d'un pied cube on en peut faire entrer des quantités très-différentes, suivant le degré de compression qu'on lui donne. Il est probable que tout l'air d'un appartement pourrait entrer dans un fusil à vent, si le réservoir était assez fort pour résister à la pression. Ainsi, la quantité de matière n'est pas proportionnelle au volume.

C'est en vain que l'on chercherait quelque autre caractère extérieur pour juger de la quantité de matière qui est contenue dans un espace donné; on n'y arriverait jamais, s'il n'y avait dans la nature quelque force particulière qui remplît les conditions suivantes : 1° qui sollicitât également tous les atomes des corps, et 2° qui fût telle que l'on pût

en obtenir la résultante. Or la pesanteur est une force de cette espèce; elle agit également sur toutes les substances, puisque toutes, dans leur chute, prennent la même vitesse, et on peut connaître sa résultante sur un corps donné, puisque cette résultante est le poids du corps. C'est d'après cette vérité d'expérience qu'il est permis de conclure que *la masse ou la quantité de matière est proportionnelle au poids*. Sur quoi il faut remarquer qu'il y a deux manières d'évaluer le poids d'un corps. On peut l'évaluer au moyen de la balance, comme nous venons de l'indiquer; alors le poids est indépendant de l'intensité de la pesanteur. Par exemple, si une balance est en équilibre à Paris, ayant une certaine quantité de fer dans un de ses plateaux et dans l'autre des poids de cuivre, de la valeur d'un kilogramme, elle serait encore en équilible au sommet des Alpes, quoique au sommet des Alpes la pesanteur fût moindre qu'à Paris. Cela est ainsi, parce que le fer, le cuivre et toutes les substances gagnent du poids ou en perdent dans le même rapport, quand la pesanteur augmente ou quand elle diminue; la même balance serait encore en équilibre si on la portait aux limites de l'atmosphère, ou à la surface de la lune, ou même jusqu'à la surface du soleil. Au contraire, si l'on voulait évaluer les poids au moyen d'un ressort gradué qui fléchît d'une certaine quantité, le volume de fer, qui à Paris marquait un kilogramme, ferait bien moins fléchir le ressort au sommet des Alpes, et le ferait fléchir vingt-six ou vingt-sept fois davantage à la surface du soleil; son poids évalué de cette manière changerait donc avec la pesanteur, et cependant sa masse ne changerait pas. Le poids donné par la balance peut être appelé poids relatif; celui qui est donné par le ressort peut être appelé poids absolu : alors il est vrai de dire que *la masse d'un corps est proportionnelle à son poids relatif*, ou bien qu'elle est proportionnelle à son poids absolu divisé par l'intensité de la pesanteur.

Il se pourrait qu'il y eût dans la nature des substances

*impondérables*, sur lesquelles la pesanteur n'exerçât aucune espèce d'action; ces substances sans pesanteur seraient aussi sans poids, mais elles ne seraient pas sans masse. Seulement toute comparaison serait impossible entre elles et les masses pesantes, tant qu'on n'aurait pas découvert quelque force, ou instantanée ou constante, qui pût agir sur les substances des deux espèces. Une substance impondérable qui serait agrégée à la matière pesante pour constituer les corps, deviendrait une cause capable de retarder les mouvemens dus à la pesanteur; elle agirait comme les masses $m$ qui se font équilibre dans la machine d'Atwood, car elle partagerait le mouvement imprimé par la gravité. De ce qu'on n'observe aucun retard de cette espèce, on n'en peut pas conclure qu'il n'y a pas dans les corps de substances impondérables, mais seulement que, s'il y en a, elles y sont en masse très-petite à l'égard de la masse pondérable, ou qu'elles n'y sont pas agrégées d'une manière permanente, mais que les corps pesans la quittent quand ils se déplacent.

La densité d'un corps est égale au rapport de son poids à son volume (*); ce rapport est très-essentiel à considérer; il est pour chaque substance une propriété permanente, et souvent même il devient une propriété caractéristique. Un centimètre cube d'eau distillée de Paris pèse un gramme, c'est là notre définition, et s'il arrive que le même volume d'eau pèse le même poids dans tous les pays du monde, on ne s'en étonne pas beaucoup. Mais un centimètre cube de fer pèse $7^{g},8$, soit qu'on l'ait tiré des mines de Suède, de France ou d'Amérique, et quelles que soient les combinaisons desquelles on l'ait dégagé pour l'avoir pur. Pareillement un centimètre cube d'or pur pèse $19^{g},258$, soit qu'on l'ait tiré des mines du Pérou ou de celles du Japon.

---

(*) La densité s'appelle aussi *pesanteur spécifique* : pour que cette expression soit juste, il faut entendre que *pesanteur spécifique*, ou *pesanteur sous un volume donné*, signifie *poids sous un volume donné*.

Le poids, sous un volume donné, c'est-à-dire la densité, est donc une propriété très-fixe dans chaque substance ; bien entendu qu'il faut prendre le volume à la même température ; car nous avons vu que la chaleur dilate tous les corps. Nous apprendrons plus tard à déterminer les densités ; pour le moment, nous les supposerons connues et nous apprendrons seulement à nous en servir. De la définition que nous en avons donnée, il résulte :

1°. Qu'à volume égal les densités des corps sont proportionnelles à leurs poids ;

2°. Qu'à poids égal les densités sont en raison inverse des volumes ;

3°. Qu'en général les densités sont comme le rapport direct des poids, multiplié par le rapport inverse des volumes ;

4°. Que le poids d'un corps est égal à son volume multiplié par sa densité ;

5°. Que le volume d'un corps est égal à son poids divisé par sa densité.

Il importe d'avoir compris ces sortes de formules et d'en avoir fait plusieurs applications, pour les avoir bien présentes à l'esprit.

---

## CHAPITRE IV.

### *Du Pendule.*

46. Le pendule ordinaire se compose d'une boule pesante suspendue à l'extrémité d'un fil flexible (*Fig.* 56). Ses propriétés les plus fondamentales sont, 1° de marquer la direction verticale ou celle de la pesanteur, comme nous l'avons vu dans le chapitre Ier; 2° de faire des oscillations planes quand on l'écarte de la verticale, et qu'on l'abandonne à lui-même sans lui donner aucune impulsion. En effet, si on met le pendule dans une position quelconque FA, et qu'on le laisse tomber librement, il descend jusqu'en L, dépasse ce point, remonte de l'autre côté jusqu'en A′, en décrivant un arc LA′ égal à l'arc LA, ensuite il tombe de nouveau, arrive en L, remonte en A, et continue ainsi son mouvement pendant très-long-temps. On peut remarquer que, quand le pendule descend, la vitesse va en augmentant jusqu'en L, et qu'au contraire quand il remonte, elle va en décroissant depuis le point L jusqu'au point où il s'arrête.

L'angle AFL s'appelle *l'angle d'écart*, ou simplement *l'écart*.

Le mouvement de A en A′ ou de A′ en A est ce qu'on appelle une *oscillation*, de A en L une *demi-oscillation descendante*, et de L en A′ une *demi-oscillation ascendante*.

L'*amplitude* de l'oscillation est l'arc AA′ mesuré en degrés, minutes et secondes.

La *durée* d'une oscillation est le temps que le pendule met à parcourir cet arc.

La première conséquence qui se présente après ces observations, c'est que le mouvement du pendule est le mou-

vement perpétuel car, si en partant de A, il remonte à une hauteur A′ qui soit la même, il faut aussi qu'en partant de A′ il revienne exactement en A; et, ce qu'il a fait la première fois, il le fera la seconde, la troisième et ainsi de suite perpétuellement.

Cette conclusion serait de toute rigueur, si en effet la hauteur du point A′, où il arrive, était exactement égale à la hauteur du point A, d'où il est parti; mais les frottemens du point de suspension F, et la résistance de l'air que la boule doit pousser devant elle, empêche que cette égalité ne soit absolue. La différence ne devient sensible qu'après un certain nombre d'oscillations; et loin de s'étonner que le mouvement ne soit pas perpétuel, on s'étonne qu'il puisse se continuer pendant si long-temps : car un pendule peut, sans s'arrêter, faire des oscillations pendant des heures entières.

Le pendule est un des instrumens les plus simples de la physique, et cependant il est un des plus curieux à étudier, parce qu'il sert à la mesure exacte du temps, à la détermination de la figure de la terre, et à l'une des questions les plus importantes sur la gravitation générale de la matière.

47. *Lois des oscillations du Pendule.* — 1°. La durée des oscillations qui sont *très-petites* est indépendante de leur amplitude. On dit qu'elles sont *isochrones*, pour exprimer qu'elles se font toutes dans le même temps. Les oscillations de 4 ou 5 degrés d'amplitude ne sont plus des oscillations très-petites, elles commencent à avoir une durée sensiblement plus grande.

2°. La durée des oscillations est tout-à-fait indépendante du poids de la boule et de la nature de sa substance.

3°. Les durées des oscillations sont entre elles comme les racines carrées des longueurs des pendules.

Ces lois se déduisent rigoureusement des principes de mécanique, mais en physique on les démontre approximativement par l'expérience.

48. La première loi exigerait trop de temps pour qu'on essayât de la démontrer dans un cours : puisqu'il faudrait compter plusieurs centaines d'oscillations ; les unes au commencement, quand l'amplitude est de 4 ou 5 degrés ; les autres un peu plus tard, quand elles sont réduites à 2 ou 3 degrés ; et les dernières vers la fin du mouvement, quand elles ne sont plus sensibles à l'œil, et qu'il faut les observer avec une lunette. On s'étonne d'abord que le pendule mette presque autant de temps à parcourir un arc de $\frac{1}{10}$ de degré qu'à parcourir un arc de 10 degrés, qui est par conséquent cent fois plus grand ; mais on en conçoit la raison en observant que, dans le deuxième cas, la pesanteur lui imprime beaucoup plus de vitesse, parce qu'elle agit plus obliquement et d'une manière plus efficace. Cette *loi de l'isochronisme* est une des premières découvertes de Galilée : on rapporte que, étant très-jeune encore, il vit par hasard, dans l'église métropolitaine de Pise, les balancemens d'une lampe suspendue à la voûte, et qu'il resta très-frappé des retours périodiques de ces mouvemens et de l'égalité de leur durée. Il n'en fallut pas davantage pour éveiller son génie, et cette observation d'un enfant devint la source des plus grandes découvertes.

49. La seconde loi se démontre facilement.

On prend différentes boules, de métal, d'ivoire, ou d'autres substances ; on en compose des pendules de même longueur, que l'on fait osciller ensemble, et l'on voit que tous ces pendules restent d'accord pendant très-longtemps.

Quand la pesanteur agit pour faire osciller un pendule, elle agit séparément sur chacun des atomes de matière qui composent la boule ; ainsi un seul atome de fer, par exemple, suspendu à l'extrémité du fil, doit osciller avec la même vitesse que deux atomes pris ensemble, puisqu'ils ont leur force séparée, et que cette force a pour chacun

d'eux la même intensité; il doit osciller comme le ferait une réunion quelconque d'atomes; et en effet, sans les résistances et les frottemens, il oscillerait comme une grande boule de fer. De plus, la pesanteur agissant de la même manière sur toutes les substances, un atome de fer doit osciller comme un atome d'ivoire, d'or, ou de platine, et par conséquent toutes les masses, quelle que soit leur nature, doivent osciller avec la même vitesse. Cette expérience est importante, puisqu'elle donne une autre preuve que la pesanteur agit de la même manière sur tous les corps. L'expérience que nous en avons déjà faite dans le tube vide d'air n'est qu'une expérience grossière, puisque la pesanteur n'agit que pendant quelques fractions de secondes, tandis qu'avec le pendule nous pouvons observer ses effets sur les différens corps pendant des heures entières. Ils ne tombent, il est vrai, que dans l'arc d'oscillation, qui se replie sur lui-même un grand nombre de fois; mais il est évident que, pour la conséquence qui nous occupe, c'est comme s'ils tombaient d'un mouvement rectiligne et progressif. C'est par des observations de cette espèce, mais qui exigeraient beaucoup de soins et de précision, que l'on pourrait découvrir s'il existe en effet, dans l'intérieur des corps, quelque substance impondérable, agrégée d'une manière permanente à la matière pondérable, et ayant, par rapport à elle, une masse sensible à volume égal. On ne peut rien déduire des observations de Mairan sur ce sujet; elles n'ont point été faites dans cette vue, et elles datent d'une époque où l'on aurait vainement cherché le degré de précision auquel on peut atteindre aujourd'hui.

50. La troisième loi se démontre avec des pendules de diverses longueurs : si, par exemple, on prend trois pendules, dont les longueurs soient entre elles comme les nombres 1, 4, 9, alors les durées des oscillations doivent être comme les nombres simples, 1, 2, 3; et, en effet, si

on fait osciller de tels pendules, soit en les suspendant au devant l'un de l'autre, soit en les ajustant par un double fil (*Fig.* 59), on compte facilement que celui dont la longueur est 1, comparé à celui dont la longueur est 4, fait deux oscillations pour une, et qu'il en fait trois pour une, quand on le compare à celui dont la longueur est 9. Ce n'est que par des considérations mécaniques que l'on peut se rendre un compte exact de ce résultat important.

51. *De l'Intensité de la Pesanteur, du Pendule simple, du Pendule absolu, et du Pendule invariable.* — Les lois dont nous venons de parler sont tout-à-fait indépendantes de l'intensité de la pesanteur. Supposez que cette force devienne cent fois plus intense ou cent fois plus faible, les petites oscillations seraient encore isochrones entre elles, et leur durée conserverait encore le même rapport avec les poids des pendules et avec leurs longueurs. Mais, bien que ces lois ne changent pas avec l'intensité de la force, il y a cependant quelque chose qui change, c'est la durée absolue de chaque oscillation. Si la pesanteur cessait d'agir à un instant donné, les corps cesseraient de tomber, et les pendules cesseraient d'osciller; ou, du moins, les corps ne tomberaient plus qu'en vertu de leur vitesse acquise, et les pendules qui sont actuellement en mouvement décriraient des cercles entiers, sans être rappelés dans la verticale et sans être arrêtés par autre chose que par le frottement. Au contraire, si la pesanteur venait à doubler d'intensité, les corps tomberaient plus vite, et les pendules seraient plus prompts dans les retours de leurs battemens.

Mais le vrai rapport qui existe entre la durée des oscillations, la longueur du pendule et l'intensité de la pesanteur ne peut être trouvé que par les lois de la mécanique, et il ne peut être exprimé que par une formule qu'il est très-important de connaître.

Soit $l$ la longueur d'un pendule quelconque, exprimée en mètres.

Soit T la durée d'une oscillation de ce pendule, exprimée en secondes sexagésimales.

Soit $\pi$ le rapport approché de la circonférence au diamètre, dont la valeur est, comme on sait, $\pi = 3,1415926$.

Enfin soit $g$ l'intensité de la pesanteur, c'est-à-dire le nombre de mètres qui exprime la vitesse d'un corps, après une seconde de chute libre.

On aura pour la formule du pendule

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \text{ d'où } g = \frac{\pi^2 l}{T^2};$$

c'est-à-dire que l'intensité absolue de la pesanteur est égale au carré du rapport approché de la circonférence au diamètre, multiplié par la longueur du pendule qu'on observe, et divisé par le carré du temps d'une oscillation.

Pour avoir l'intensité de la pesanteur, il suffira donc de faire osciller un pendule, d'en mesurer la longueur pour avoir $l$, d'observer la durée d'une oscillation pour avoir T, et de faire ensuite les calculs indiqués.

Cette formule est celle qui convient au pendule *simple;* on appelle ainsi un pendule idéal, qu'il est facile de concevoir, mais qu'il est impossible de construire. Il se composerait d'un fil inextensible et sans pesanteur, à l'extrémité duquel serait fixée une seule molécule de matière pesante.

52. Tout pendule qui n'est pas simple, comme le précédent, s'appelle *pendule composé;* ainsi un fil inflexible et sans pesanteur, auquel seraient attachées seulement deux molécules pesantes, $l$ et L (*Fig.* 57), formerait un pendule composé. Dans cet appareil, la vitesse d'oscillation se *compose* en effet des vitesses d'oscillation que prendrait séparément chacune des petites masses, en oscillant librement. La molécule $l$, qui n'est qu'à la distance

F$l$ du point de suspension, tend à osciller plus vite que la molécule L, qui en est à la distance FL; mais, puisqu'elles sont liées l'une à l'autre, forcées de marcher ensemble et d'accomplir leur oscillation dans le même temps, la première est retardée par la seconde, et la seconde accélérée par la première : de là, une vitesse intermédiaire, qui est la vitesse du pendule composé. Dans tout corps qui oscille, il se fait une compensation analogue, entre toutes les vitesses différentes que prendraient les diverses molécules, si chacune d'elles oscillait librement. Pour faire mieux entendre cette vérité fondamentale, nous prendrons encore un exemple : F$p$. (*Fig.* 58) représente un pendule ordinaire, tel à peu près que ceux qui servent de régulateurs aux horloges; F est le point fixe, F$t$ est ce qu'on appelle la tige, et $ll'$ la lentille. Le point $m$, et ceux qui sont comme lui très voisins de l'axe de suspension, marcheraient très-vite, s'ils étaient seuls. Au contraire, le point extrême $p$, et ceux qui sont comme lui très-bas, ne pourraient marcher que très lentement. Les premiers sont donc retardés par l'effort qu'ils font pour entraîner les derniers, et ceux-ci sont accélérés par l'impulsion qu'ils en reçoivent. Donc, entre le point $m$ et le point $p$ il y a un certain point C, qui n'est, lui, ni retardé ni accéléré, et qui fait son oscillation exactement comme s'il était seul, et librement suspendu à l'extrémité du fil FC; ce point remarquable est appelé le *centre d'oscillation*. Dans tout pendule composé il se trouve nécessairement un ou plusieurs centres d'oscillation, et leur distance *commune* au point de suspension est ce que l'on nomme la *longueur du pendule*. Cette longueur est en effet égale à celle du pendule simple, qui oscillerait avec la même vitesse que le pendule composé. Le centre d'oscillation dépend de la forme du corps qui oscille, quand ce corps est homogène; et il dépend de sa forme et de la densité de ses parties, quand il est hétérogène. Un pendule tout

en cuivre aurait, par exemple, son centre d'oscillation en C (*Fig.* 58), quand sa tige serait très épaisse, et en C', si elle se réduisait à un fil. Un petit poids que l'on ajouterait vers l'extrémité inférieure $p$, ferait descendre encore le centre d'oscillation, et il le ferait remonter, si on l'ajoutait vers le haut. Aussi voit-on, dans quelques horloges, un *curseur* pesant, qui peut glisser le long de la tige du pendule, et que l'on fait descendre ou monter pour faire retarder ou avancer l'horloge; mais le plus souvent cet effet se produit par la lentille elle-même, qui peut être relevée ou rabaissée par un petit mouvement de vis.

Puisque nous ne pouvons employer que des pendules composés, on voit, d'après ce qui précède, que, pour déterminer l'intensité de la pesanteur par les observations du pendule, il se présente deux grandes difficultés : Premièrement, celle d'observer avec précision la durée d'une oscillation; secondement, celle de déterminer avec exactitude la longueur du pendule que l'on fait osciller : car ce n'est qu'après avoir trouvé ces deux élémens essentiels, que le pendule composé peut être *ramené* au cas du pendule simple, et qu'il est permis d'employer la formule $T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, pour en tirer la valeur $g$ de l'intensité de la pesanteur.

Borda est le premier physicien qui nous ait donné une méthode exacte pour mesurer le pendule : il avait le génie des recherches de cette espèce, car il avait le génie de la précision. Ses expériences furent faites, en 1790, à l'Observatoire de Paris, et l'on peut dire qu'avant cette époque il n'y avait pas un lieu de la terre où la force de la pesanteur fût connue. MM. Biot, Bouvard et Mathieu ont répété les mêmes expériences en 1808, d'après les procédés de Borda et avec des instrumens analogues. En 1818, M. Arago et M. de Humboldt en ont fait encore

une vérification par d'autres procédés. Toutes ces expériences confirment l'exactitude de celles de Borda, et il en résulte enfin que l'intensité de la pesanteur est, à Paris, telle qu'il l'avait trouvée, savoir de $9^{m},8088$. C'est-à-dire qu'un corps qui tombe dans le vide pendant une seconde, acquiert une telle vitesse que, si la pesanteur cessait d'agir sur lui, il parcourait $9^{m},8088$ dans toutes les secondes suivantes. Ce qui peut s'exprimer encore en disant qu'un corps qui se meut dans le vide, en partant du repos, parcourt en $1''$ un espace qui est de $4^{m},9044$; car nous avons vu que la vitesse qui a lieu après l'unité de temps est double de l'espace parcouru pendant cette unité.

53. Il faut avoir une grande habitude des expériences, et même des expériences de cette nature, pour comprendre les soins minutieux, les corrections délicates qu'elles exigent, et toute l'habileté qu'elles supposent dans l'observateur; mais il est si important d'avoir une idée générale des méthodes d'observation que nous devons indiquer ici ce qu'il y a de plus essentiel dans la méthode de Borda. Son pendule s'appelle *pendule absolu;* il se compose d'une boule pesante, suspendue par un fil très-fin (*Fig.* 65). La boule étant homogène et parfaitement sphérique, et le fil étant lui-même homogène, quoique d'une autre substance, on peut calculer exactement le lieu du centre d'oscillation. Ayant trouvé, par exemple, qu'il est en *c*, on voit qu'il suffit alors de mesurer la longueur totale, depuis le point de suspension jusqu'au point *t*, et d'en retrancher *ct* pour avoir la vraie longueur du pendule.

La boule est en platine; on choisit ce métal, parce qu'il est le plus inaltérable, et aussi parce qu'il est le plus dense, et par conséquent le moins sensible à la résistance de l'air. Sur la boule, s'ajuste une calotte exactement du même rayon qu'elle; et l'adhérence qui s'établit entre leurs surfaces, au moyen d'une légère couche de graisse, suffit seule pour soutenir tout le poids de la boule. Le fil de suspension

est un fil de cuivre, qui, d'une part, traverse en son milieu l'extrémité de la queue de la calotte, et vient se fixer entre les deux pièces dont cette queue se compose, et qui va, de l'autre part, s'attacher de la même manière par son extrémité supérieure. Cette seconde pièce, qui pince l'extrémité supérieure du fil, vient s'adapter à l'appareil de suspension que l'on voit dans la *figure* 65. Il se compose, 1° d'un prisme d'acier, que l'on appelle le *couteau du pendule*, parce qu'en effet il a un tranchant assez vif, par lequel il repose sur des plans d'agate, et 2° d'un cylindre d'acier qui traverse le couteau perpendiculairement et qui vient recevoir la pièce qui porte le fil.

La *figure* 66 représente la disposition générale de l'appareil.

Pour déterminer la durée d'une oscillation, on met le pendule en mouvement à une heure fixe, marquée sur une bonne pendule ou sur un bon chronomètre; puis on le laisse osciller pendant plusieurs heures, et on observe l'instant précis où il achève sa dernière oscillation. Le temps qui s'est écoulé entre le commencement de la première oscillation et la fin de la dernière est le temps pendant lequel le pendule a marché: soit $4^h\ 10'$ ou $15000''$. Si l'on savait maintenant combien il y a d'oscillations, si l'on savait, par exemple, qu'il en a fait 20000, on dirait: En $15000''$ il a fait 20000 oscillations, d'égale durée; donc pour une seule oscillation il a employé $\frac{3''}{4}$; et si l'on ne s'est pas trompé d'une oscillation sur ces 20000, il en résulte qu'on ne se sera pas trompé de $\frac{3''}{80000}$ ou de $\frac{1}{26666}$ de seconde, sur la durée de chaque oscillation.

Mais comment trouver ce nombre exact d'oscillations? L'on conçoit bien que l'observateur ne peut pas les compter une à une; il y aurait trop d'ennui, et surtout trop de chances d'erreur; aussi, l'on y parvient plus ingénieuse-

ment. On a même pour cela deux moyens qui sont également sûrs; le premier est d'avoir un compteur, que l'on règle sur le pendule par des essais préalables: une fois qu'ils sont d'accord, il ne reste à l'observateur qu'à veiller les dérangemens qui peuvent survenir par le décroissement d'amplitude dans les oscillations du pendule et à presser le compteur avec la main, ou autrement, pour le remettre d'accord. On lit sur le cadran du compteur le nombre des oscillations qu'il a faites, et c'est aussi le nombre exact des oscillations du pendule. L'autre moyen est ce que l'on appelle la *méthode des coïncidences*; c'est celui qui a été employé par Borda. Il consiste à placer le pendule au devant d'une horloge, comme on le voit dans la *figure* 66, et à lui donner une telle longueur que ses oscillations soient un peu plus lentes ou un peu plus rapides que celles de l'horloge. On les fait partir ensemble, et on les observe avec un grand soin; dès les premières oscillations, on les voit qui se séparent. Le pendule, par exemple, sera en retard sur l'horloge, et ils se sépareront de plus en plus jusqu'à ce qu'enfin l'horloge ayant gagné d'avance une oscillation juste, ils se retrouvent ensemble comme au départ: c'est là ce qu'on appelle une *coïncidence*. Il suffira donc que l'observateur tienne un compte exact de toutes les coïncidences qui ont lieu pendant les cinq ou six heures que dure une expérience, et alors, par le temps qui s'est écoulé, il connaît le nombre total des oscillations de l'horloge; par le nombre des coïncidences, il connaît l'avance qu'elle a prise. D'où il conclut enfin le nombre des oscillations du pendule, et par suite la durée de chaque oscillation.

Pour mesurer ensuite la longueur du pendule, on se sert d'un plan d'acier poli, qu'on ajuste très-exactement au dessous de la boule et très-solidement (*Fig.* 66). On le soulève peu à peu par le mouvement d'une vis, sans qu'il cesse d'être horizontal; enfin, quand il arrive à toucher la boule, de manière qu'elle le rase légèrement en faisant ses

oscillations, on est bien assuré que la distance de ce plan aux plans fixes qui portent le couteau, est précisément la distance qui se trouve entre le tranchant du couteau et le point le plus bas de la boule; alors on enlève le pendule, et à sa place on ajuste une règle divisée, qui repose sur les plans fixes par un couteau tout-à-fait semblable au couteau du pendule (*Fig.* 69). Cette règle est représentée de face dans la *figure.* 68, et de profil dans la *figure* 67. On voit une languette $l$, qui sort ou qui rentre par le mouvement de la vis $v$. Quand la règle a pris la place du pendule, on fait sortir la languette peu à peu jusqu'à ce qu'elle vienne effleurer le plan d'acier, comme faisait le point $t$ de la boule. Des divisions tracées sur la languette et sur la règle font connaître la longueur absolue, qui se trouve alors depuis le tranchant du couteau jusqu'à l'extrémité de la languette; on se sert aussi pour cet objet du *comparateur* représenté *figure* 70. Connaissant cette distance, on en retranche la distance du centre d'oscillation au point le plus bas de la boule, et l'on a enfin la longueur du pendule. Cette longueur $l$, et la durée $\mathrm{T}$ de l'oscillation correspondante étant substituées dans la formule $\mathrm{T}=\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, on en déduit enfin la valeur de $g$. Avec ces données, il est très-facile de calculer la longueur du *pendule à secondes*, c'est-à-dire du pendule qui ferait juste une oscillation par seconde; et il est clair que l'intensité de la pesanteur est aussi bien définie par la longueur du pendule à secondes que la valeur de $g$, puisqu'au moyen de la formule, l'un de ces élémens peut se déduire de l'autre.

On emploie le *pendule décimal* ou le *pendule sexagésimal.* Ces dénominations sont relatives au temps, car un *jour solaire moyen* se divise tantôt en parties décimales, tantôt en parties sexagésimales. Dans le premier cas, le jour se compose de 10 heures, chaque heure de 100′ et chaque minute de 100″, ce qui fait 100000″ décimales en un jour;

dans le second cas, le jour se divise en 24 heures, chaque heure en 60′ et chaque minute en″, ce qui fait 86400″ sexagésimales en un jour. Le pendule décimal est celui qui fait une oscillation en 1″ décimale, et le pendule sexagésimal celui qui fait une oscillation en 1″ sexagésimale.

A Paris la longueur du pendule sexagésimal est de 993$^{mm}$,8267 d'après les mesures de Borda. Les mesures qui en ont été prises depuis ne surpassent celle-ci que de 18 millièmes de millimètre.

A Londres, la longueur du pendule sexagésimal est de 994$^{mm}$,1147. Elle a été déterminée en 1818, par le capitaine Kater, au moyen d'un appareil de son invention, qui est très-ingénieux et qui est susceptible d'une grande exactitude (*Fig.* 62, 63 et 64). C'est un pendule à forte tige et à lentille, portant deux couteaux fixes, tellement disposés, que le tranchant de l'un passe par les centres d'oscillation de l'autre. Ainsi, après avoir fait osciller le pendule sur l'un des couteaux, on le retourne de haut en bas pour le faire osciller sur l'autre, et l'on retrouve exactement la même durée d'oscillation. C'est donc ici la distance des deux tranchans qui est la vraie longueur du pendule, et on peut la mesurer avec une grande précision.

54. Pour déterminer l'intensité de la pesanteur en divers lieux de la terre, il faudrait faire, dans chacun de ces lieux, ce qui a été fait à Paris ou à Londres. Mais on peut y parvenir encore par un autre moyen, qui offre de grands avantages lorsqu'il s'agit de parcourir les mers et d'aborder sur des côtes désertes, où il est impossible de s'établir d'une manière permanente, comme dans un observatoire. Ce moyen consiste à employer le pendule que l'on appelle *pendule invariable*. Il se compose d'une forte tige de cuivre ou de bois, qui est traversée dans sa partie supérieure par un couteau semblable à celui du pendule, et qui porte à sa partie inférieure une lentille pesante, amincie sur les bords, pour mieux fendre l'air dans ses oscillations. Un trépied

solide est destiné à porter le plan d'agate sur lequel on pose le couteau du pendule, lorsqu'on veut le mettre en expérience. Ce trépied lui-même doit reposer sur un sol inébranlable, et, pour cela, le voyageur emporte avec lui des massifs de pierre de taille, qu'il se contente d'établir à quelques pieds de profondeur quand il est en terre-ferme, et qu'il établit sur pilotis quand il est en terre sablonneuse. C'est sur cette base solide que l'on fait osciller le pendule invariable, avec infiniment de soins et de précautions. On ne mesure point sa longueur, mais on compte, avec une grande exactitude, le nombre des oscillations qu'il fait dans un temps donné. Supposons qu'un navigateur ait fait le tour du monde avec un pendule de cette espèce, et qu'il l'ait observé en cent endroits différens, sur les sommets des îles, au milieu de l'Océan, sur les grandes côtes des deux mondes, et sur les terres volcaniques. Au retour de son voyage, qu'il vienne à Paris ou à Londres, faire osciller ce même pendule : il en pourra conclure l'intensité absolue de la pesanteur, pour tous les lieux où il a fait ses stations; car le pendule étant le même, l'intensité de la pesanteur dans un de ces lieux, et l'intensité de la pesanteur à Paris, par exemple, seront entre elles en raison inverse des carrés des temps d'une oscillation. Ce n'est plus qu'une règle de trois, dont un seul terme est inconnu. C'est ainsi que l'on est parvenu à déterminer l'intensité de la pesanteur en plusieurs points de la terre.

M. Biot l'a déterminée, au moyen du pendule absolu, sur plusieurs points du méridien de Paris, dans une étendue d'environ 550 lieues : depuis les îles Baléares, sur les côtes de l'Espagne, jusqu'aux îles Shetland, les plus septentrionales des Orcades; et aussi, en 1825, en plusieurs points de la Sicile et de l'Italie. D'autres observateurs ont employé le pendule invariable en différens lieux : le capitaine Kater en Écosse et en Angleterre, en 1817 et 1818; le capitaine Freycinet, dans un voyage de découvertes autour

du monde, de 1817 à 1820; le cpitaine Duperrey, dans un voyage semblable, de 1822 à 1824; et le capitaine Sabine, de 1821 à 1824, dans divers voyages en Afrique et en Amérique, depuis l'équateur jusqu'à la latitude septentrionale de 79°.

Dans le tableau qui termine ce chapitre, nous avons essayé de réunir les résultats de toutes ces observations.

54. *De la Figure de la Terre.* — On sait que les plus hautes montagnes ne sont que de très-petites éminences, par rapport au globe de la terre : tels à peu près que seraient des grains de sable, disséminés sur un globe d'un mètre de rayon; il paraît que les plus grands bassins des mers ne sont que de petites cavités, analogues aux saillies des montagnes. Ainsi, prise dans son ensemble, la surface de la terre est sensiblement régulière, et peut être considérée comme telle dans les calculs. Les plus anciens astronomes avaient reconnu sa courbure, et, comme dans leurs idées la sphère était la forme la plus parfaite, ils n'avaient pas douté que la terre ne fût une sphère très-exacte; on peut même présumer, d'après quelques documens historiques, qu'ils avaient fait de grands efforts pour en mesurer les dimensions, et qu'enfin ils y étaient parvenus d'une manière assez approchée. Cependant la terre n'est point sphérique: Newton avait annoncé qu'elle est aplatie vers les pôles et renflée à l'équateur, et cette vérité a été démontrée dans le dernier siècle par des mesures directes. Cette découverte, qui a exigé d'immenses travaux, n'est encore qu'un premier pas dans la grande question de la figure de la terre; après avoir démontré qu'elle n'est pas sphérique, il faut démontrer maintenant de combien elle est aplatie, et reconnaître toutes les irrégularités et tous les accidens qu'elle présente. Pour trouver le poids des planètes et les dimensions du système du monde, il n'a fallu que quelques hommes de génie; pour trouver la forme exacte de la terre dans toute l'étendue de sa surface, il faut de plus le concours

des peuples et des gouvernemens. Cependant, de nombreux voyages heureusement exécutés; de grandes opérations, les unes terminées avec succès, les autres commencées par des savans habiles et protégées par les gouvernemens des deux mondes; un grand zèle de toutes parts, chez tous les peuples savans, tout semble annoncer que le problème de la figure de la terre sera enfin résolu, et que sa solution sera un des monumens scientifiques de notre siècle.

Si la terre était solide dans toute sa masse, ou seulement dans toute la couche extérieure qui sert d'enveloppe aux parties centrales, elle pourrait avoir une forme quelconque, et n'être ni sphérique ni sphéroïdale: seulement, il y aurait un certain rapport entre sa forme et les périodes de ses mouvemens. Au contraire, si la terre était toute fluide, elle aurait nécessairement la forme d'un sphéroïde, ou d'une sphère aplatie aux deux pôles; car la force centrifuge, qui résulte du mouvement de rotation qu'elle accomplit sans cesse sur son axe, repoussant le fluide de plus en plus, l'accumulerait vers les régions de l'équateur, où elle le soutiendrait à un niveau plus élevé. Le globe entier de la terre étant composé en même temps, des substances solides qui forment les continens et les montagnes, et de la masse fluide qui remplit les bassins des mers, on voit qu'il y a deux questions à se proposer sur la figure de la terre: savoir : quelle est la forme générale de la surface solide des continens, et quelle est la forme de la surface des eaux. Pour celle-ci, il faut bien qu'elle soit renflée à l'équateur, car rien ne s'oppose à l'effet actuel de la force centrifuge : les eaux de l'Océan cèdent à son action, malgré les îles et les sinuosités des grandes côtes, à peu près comme elles feraient si elles avaient leur niveau élevé de plusieurs mille mètres au dessus des sommets des montagnes. Ainsi, si tout à coup le mouvement de rotation de la terre était arrêté, on verrait à l'instant l'excès des eaux soulevées par la force centrifuge se précipiter de l'équateur vers les pôles. A l'é-

quateur le niveau baisserait, non pas de quelques mètres, mais probablement de quelques lieues; les rescifs et les hauts-fonds deviendraient des sommets de montagnes et des plateaux élevés; les flancs de la mer seraient d'immenses collines; et sans doute, dans une vaste étendue de pays, le fonds de la mer lui-même formerait des plaines et des vallées. Au pôle arriverait un déluge : les continens seraient submergés, les montagnes de glace seraient arrachées et soulevées par les eaux; elles deviendraient flottantes comme des vaisseaux, et sans doute, au milieu de cette désolation, elles seraient le refuge le plus assuré; mais ce n'est que vers les pôles que l'on peut naviguer avec des vaisseaux de cette espèce.

Pour nous, dans notre région moyenne, nous n'aurions pas de grands changemens à redouter; entre un déluge vers le nord et un affaissement des eaux vers le midi, la mer Méditerranée et la Manche resteraient à peu près à leur niveau. Seulement, nous verrions passer sur nos côtes cette prodigieuse marée, allant du midi vers le nord, emportant sous les pôles d'immenses débris de la zône torride; et peut-être aurions-nous à craindre qu'en passant elle n'en couvrît nos terres. Dans l'hypothèse d'une fluidité complète, le niveau baisserait à l'équateur de 6957 mètres, il s'élèverait au pôle de 13915$^{m}$, il resterait le même à la latitude de 35° 16′, et à Paris il s'élèverait de 2000 mètres au dessus de la plate-forme de l'Observatoire. Telle est, dans l'équilibre général, l'influence de la force centrifuge qni résulte du mouvement de rotation de la terre; et telle est l'idée que nous pouvons prendre de cette cause permanente qui maintient la surface mobile de la mer, toujours renflée à l'équateur et aplatie vers les pôles.

Quant à la forme générale de la surface solide des continens, il résulte aussi des observations qui ont été faites, qu'elle est elle-même aplatie comme la surface des eaux, ou à peu près; c'est-à-dire qu'elle offre la même courbure que

si le globe entier de la terre, ayant été fluide autrefois, ne se fût consolidé qu'après avoir tourné sur lui-même, comme il tourne aujourd'hui, et après avoir reçu la forme qui résulte nécessairement de ce mouvement de rotation. Une preuve frappante de l'aplatissement de la surface continentale, c'est que les montagnes des régions polaires ne sont pas très-élevées au dessus du niveau de la mer; et cependant si la surface de la terre était sphérique, tandis que la surface des eaux est aplatie, on voit qu'à l'équateur les montagnes devraient être moins hautes qu'au pôle de toute la valeur de l'aplatissement, c'est-à-dire de 4 à 5 lieues; tandis qu'il paraît au contraire que les montagnes de l'équateur restent encore plus élevées que celles du pôle.

Si l'on était sûr qu'en effet la terre eût été autrefois liquide, on pourrait calculer l'aplatissement qu'elle a dû prendre, et par conséquent l'aplatissement qu'elle conserve aujourd'hui; ou du moins on pourrait calculer les limites entre lesquelles il resterait compris, en faisant toutes les hypothèses plausibles sur la densité des couches intérieures. Alors il serait curieux de la mesurer dans toutes ses dimensions, pour vérifier cette belle déduction des principes et des lois de la mécanique. Mais l'incertitude où nous sommes sur les époques qui remontent au delà de quelques siècles, donnent encore plus d'importance à ces mesures directes; car si la terre n'a pas été fluide, il est possible qu'elle soit inégale et bosselée, et que sa surface, au lieu d'être régulièrement aplatie, comme celle d'un sphéroïde, soit simplement aplatie par quelques causes accidentelles, et qu'elle offre du reste de grandes inégalités, dépendant de l'inégale distribution et de l'inégale densité des matières intérieures. Ainsi, dans tous les cas, la détermination directe de la figure de la terre est une des plus curieuses et des plus importantes questions que nous puissions nous proposer. On essaie de la résoudre par deux moyens: par les opérations géodésiques et par les observations du pendule.

56. Pour exécuter les mesures géodésiques, on choisit, dans une grande étendue de pays, des points remarquables, comme des crêtes de montagnes, des pointes de clocher, ou des sommets d'édifice, de la fixité desquels on soit très-assuré. On les choisit de telle manière que, de chacun, on puisse en apercevoir au moins deux autres. Enfin on mesure, avec toute la précision possible, une longue *base* dont les deux extrémités deviennent des points fixes analogues aux précédens. Alors tous ces points sont enchaînés par des triangles, c'est-à-dire que l'observateur passe successivement à chacun d'eux, qu'il dirige un rayon visuel à tous les autres points qui, de là, peuvent être visibles, et qu'il mesure avec un grand soin les angles que tous ces rayons visuels font entre eux. On conçoit qu'une pareille chaîne de triangles puisse s'étendre et se prolonger aussi loin que vont les continens; on conçoit même qu'on puisse la faire passer sur la mer, pourvu que de chaque rivage on apercoive quelques points sur le rivage opposé. C'est ainsi que, sur toute la France, un réseau de triangles enchaîne tous les points les plus remarquables. Il en est de même en Angleterre, en Allemagne, en Italie; et de grandes opérations de cette nature se continuent dans le reste de l'Europe, en Amérique, et jusque dans l'Inde, où la Compagnie des Indes prend aussi une part active à la mesure de la terre.

Si cette vaste entreprise était terminée, nous connaîtrions la figure du globe, comme un propriétaire connaît le plan de son domaine; et il n'est personne qui ne comprenne les avantages prodigieux d'une telle connaissance, non-seulement pour la théorie de la terre, mais encore pour les grandes entreprises industrielles et commerciales.

Nous sommes encore loin d'être arrivés à ce point; mais déjà de diverses triangulations locales, exécutées au Pérou; en Pensylvanie, en Italie, en France, en Suède, et au Cap de Bonne-Espérance, on peut conclure d'une manière certaine que la terre est aplatie, et même on peut avoir une

première approximation de son aplatissement. On sait, par exemple, que sur le méridien de Paris la verticale du parallèle de Formentera et celle du parallèle de Dunkerque font entre elles un angle de 12° 22′ 14″. Ces deux lignes concourent au centre de la terre exactement, ou un peu plus près, ou un peu plus loin. Si, de leur point de rencontre, on décrit un arc de cercle passant par Dunkerque et par Formentera, c'est cet arc qui sera de 12° 22′ 14″. Or, de la chaîne des triangles on déduit que la distance de ces deux points, comptée sur cet arc de cercle, ou à très-peu près, est, en mètres, de 1374438,72. Donc, si 12° 22′ 14″ forment cette distance, un seul degré forme une longueur qui est très-facile à trouver; c'est cette longueur que l'on nomme un degré du méridien. Si la terre était sphérique, tous les degrés seraient égaux entre eux et vaudraient le même nombre de mètres, et réciproquement. Donc, au contraire, si l'on trouve que les degrés sont inégaux, on conclura que la terre n'est pas sphérique. On voit (*Fig.* 71) que, si elle est elliptique et aplatie vers les pôles, les verticales de l'équateur qui font entre elles un angle de 1° ou de 10°, vont se rencontrer plutôt que les verticales des pôles qui font le même angle; ainsi l'arc de 1°, compris entre les premières, a une moindre longueur, comme appartenant à un cercle d'un plus petit rayon, que l'arc de 1° compris entre les verticales des pôles; d'où il suit que *vice versâ*, si on trouve les degrés de l'équateur plus petits que les degrés des pôles, on pourra conclure, avec la plus grande certitude, le fait de l'aplatissement.

Or, des arcs dont chacun avait plusieurs degrés d'étendue, ont été mesurés sur divers méridiens et à plusieurs latitudes : au Pérou, par Bouguer et La Condamine; dans l'Inde, par Lambton; au cap de Bonne-Espérance, par Lacaille; en Pensylvanie, par Mason et Dixon; en Italie, par Lemaire et Boscowich; en France, par Delambre et Méchain; en Espagne, sur les côtes de la Méditerranée,

par Arago et Biot; en Angleterre, près de Greenwich, par Roy, Delambre et Méchain; en Suède, par Melanderhielm. De l'ensemble de ces mesures, il résulte deux conséquences: premièrement, que la terre n'est pas sphérique, puisque les degrés sont inégaux à diverses latitudes, et secondement, que la terre est en effet aplatie vers les pôles, puisque les longueurs des degrés vont en croissant à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur. En combinant ces mesures par diverses considérations géométriques, on en peut déduire les longueurs du rayon de la terre pour les diverses latitudes. On trouve alors les résultats suivans :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Rayon de l'équateur. . | 6376984 mètres | ou | 1434,8 lieues. |
| Rayon du pôle. . . . . | 6356324 | ou | 1430,1 |
| Différence. . . . . . . | 20660 | ou | 4,7 |

L'*aplatissement* est la différence entre les rayons de l'équateur et du pôle divisée par le rayon de l'équateur; il est donc, d'après ces mesures, de $\frac{1}{308,65}$. Le *rayon moyen* de la terre est celui qui correspond à la latitude de 45°; on le trouve de 6336745$^{m}$ = 1432,4 lieues. En combinant d'autres mesures, on trouve un autre rayon qui diffère un peu du précédent, et qui est de 6366194. La différence est insensible dans la plupart des applications, puisque 500 mètres ne sont que la dixième partie de la hauteur du Mont-Blanc.

Newton, en supposant que la terre a une densité uniforme, trouvait son aplatissement de $\frac{1}{230}$. Huyghens, en supposant qu'elle a au centre une densité infinie, trouvait $\frac{1}{578}$. M. de La Place, par une théorie plus complète, trouve que l'aplatissement est de $\frac{1}{305}$. Ainsi, non-seulement les géomètres ont pu prédire que la terre est aplatie, mais on voit encore que M. de La Place est parvenu, par la seule puissance de la théorie, à trouver la vraie valeur de cet aplatissement; ce résultat est une preuve frappante de la dépen-

dance qui existe entre les divers phénomènes de la nature, puisque c'est sur les inégalités des mouvemens de la lune, que M. de La Place a fondé ses calculs.

55. Les observations du pendule peuvent servir à déterminer la figure de la terre, en supposant qu'elle est en effet un sphéroïde, composé de couches homogènes, dont la densité varie de l'une à l'autre suivant une loi quelconque : car dans cette hypothèse :

A étant l'aplatissement,

Q la longueur du pendule à l'équateur,

D l'excès de la longueur du pendule au pôle sur sa longueur à l'équateur,

On démontre que ces trois quantités sont liées entre elles par la relation suivante :

$$A = 0{,}00865 - \frac{D}{Q}$$

Le nombre constant 0,00865 est les $\frac{5}{2}$ du quotient de la force centrifuge à l'équateur par la pesanteur.

Il suffirait donc de déterminer les longueurs du pendule à secondes à l'équateur et au pôle : la première longueur donnerait Q, l'excès de la seconde sur la première donnerait D, et il n'y aurait plus à faire qu'une division et une soustraction pour avoir l'aplatissement. On peut même simplifier encore l'opération et se dispenser d'aller au pôle; car, dans l'hypothèse précédente, la pesanteur décroissant, suivant une certaine loi, depuis le pôle jusqu'à l'équateur, il faut que les longueurs des pendules décroissent aussi suivant la même loi; d'où il résulte une relation déterminée entre toutes les longueurs des pendules des diverses latitudes. Cette relation est la suivante :

$$l = Q + D \sin.^2 \lambda.$$

Q et D sont les mêmes que dans la formule précédentes, $\lambda$ est la latitude,

$l$ est la longueur du pendule à la latitude $\lambda$.

Ainsi, au lieu d'observer le pendule à l'équateur et au pôle, on peut l'observer à deux latitudes quelconques, pourvu qu'elles soient assez éloignées l'une de l'autre; mettre successivement pour $l$ chacune des longueurs que l'on trouve, et pour $\lambda$ la latitude correspondante; de la sorte on obtient deux équations d'où l'on tire les valeurs de Q et de D; et ces valeurs, substituées à leur tour dans la première formule, donnent la grandeur de l'aplatissement. Toutes ces observations, prises deux à deux, quel que soit le lieu où elles aient été faites, devraient, pourvu qu'elles fussent exactes, donner les mêmes valeurs de Q et de D, et par conséquent conduire à la même valeur définitive de l'aplatissement de la terre. D'après cela, on pourrait penser que deux seules observations suffisent, et qu'il n'est pas besoin de se donner tant de peine, ni de tant courir les mers et les continens pour observer le pendule sous toutes les latitudes et dans tous les climats. Mais il faut prendre garde, d'une part, que les formules que nous employons reposent sur des hypothèses qui peuvent plus ou moins s'écarter de la vérité, et que c'est là le point fondamental qu'il faut décider; et, d'une autre part, que les moyens d'observation, quelque précis qu'ils soient, ne peuvent donner un résultat certain que par une moyenne entre plusieurs résultats peu différens.

Les observations du pendule qui ont été faites jusqu'à ce jour dans les deux hémisphères, et à des latitudes très-différentes, depuis l'équateur jusqu'à la dernière ville septentrionale du monde, et même jusqu'aux régions glacées du Groënland et du Spitzberg, donnent pour l'aplatissement des résultats qui ne sont pas absolument conformes aux résultats qui se déduisent des inégalités de la lune, ou des mesures géodésiques. Les différences sont petites; car les moindres valeurs donnent près de $\frac{1}{305}$, qui est le nombre de la théorie, et les plus grandes valeurs ne dépassent

pas $\frac{1}{240}$; mais elles suffisent cependant pour qu'on puisse conclure dès à présent : 1° que la nature du sol sur lequel on fait les observations a une influence sensible sur les oscillations du pendule; 2° qu'elle a par conséquent une influence plus ou moins marquée sur l'équilibre et sur le nivellement des eaux; 3° enfin, que par ces causes la surface de la mer a très-probablement des inégalités plus ou moins grandes, des éminences et des affaissemens, qui ne l'empêchent pas d'être aplatie dans sa direction générale, à peu près comme l'indique la théorie, mais qui l'empêchent d'être une surface géométrique, exactement pareille à celle d'un ellipsoïde de révolution. Ainsi, quelles que soient les causes qui aient agi, à l'origine du monde, et quelles que soient celles qui aient pu se développer dans les catastrophes qui ont suivi, il arrive, comme on pouvait s'y attendre, que dans le sein de la terre toutes les matières ont été confondues, et que, plus pesantes ou plus légères, elles sont à peu près uniformément réparties dans toute l'étendue de chacune des couches. Il fallait qu'il en fût ainsi pour la régularité des mouvemens et pour l'ordre des saisons, car les phénomènes se passeraient d'une tout autre manière, si l'un des hémisphères était, par exemple, léger comme du liége, et l'autre lourd comme du plomb. Cependant cette homogénéité générale n'empêche pas qu'il ne se rencontre, dans le globe de la terre, quelque hétérogénéité locale qui ait déformé sa surface, et qui ait produit, de distance en distance, quelque dépression ou quelque renflement.

Le tableau général qui termine ce chapitre pourra faciliter toutes les discussions auxquelles on peut se livrer sur ce grand problème de la figure de la terre. On y doit distinguer deux choses, qui sont véritablement très-distinctes, savoir : 1° les longueurs du pendule, d'où l'on peut déduire les intensités de la pesanteur aux différentes stations, ce qui est indépendant de toute hypothèse; et 2° les différences qui se trouvent entre ces résultats et ceux de la

théorie, ce qui est dépendant des hypothèses que la théorie porte avec elle.

56. *Déviation du fil à plomb par l'attraction des montagnes.* — Toutes les portions de la matière étant attirées l'une vers l'autre, on ne voit pas d'abord pourquoi de grandes masses, telles que des montagnes, n'exercent pas d'action sensible sur les corps qui les environnent. Pourquoi, par exemple, quand on laisse tomber une pierre du haut d'un sommet élevé, cette pierre, en tombant, ne se dirige pas vers le centre de la montagne qui est très-près, plutôt que vers le centre de la terre qui est très-loin. On peut même s'étonner que les murs d'un édifice ne produisent pas cet effet, et que, dans un appartement, un corps qui est suspendu en haut ne tombe pas sur le plafond plutôt que de tomber sur le plancher : à peu près comme aux antipodes, les corps tombent en remontant vers nous. Mais dès qu'on prend garde que la plus grosse montagne n'est qu'un grain de sable, quand on la compare à la terre, on ne s'étonne plus que les montagnes ordinaires ne puissent pas attirer à elles les corps que la terre attire elle-même. L'effet qu'elles pourraient produire serait tout au plus de les dévier un peu dans leur chute. Réciproquement, si elles peuvent produire quelques déviations, on pourra être assuré que la pesanteur est, comme nous l'avons dit, une force universelle qui agit sur toute la matière, et qu'il n'y a ni tourbillon autour de la terre, ni vertu particulière vers son centre, par quoi les corps soient poussés, ou sympathiquement précipités.

Bouguer est le premier qui eut l'idée de chercher, dans l'attraction des montagnes, une preuve de l'attraction universelle de la matière ; si elles agissent, elles doivent dévier le fil à plomb. Mais comment reconnaître si le fil à plomb est dévié ? la même cause qui changerait sa direction changerait aussi celle de la surface des eaux tranquilles, à laquelle on la rapporte ; et dès-lors on ne pourrait plus juger ni de l'un ni de l'autre changement. Aussi faut-il avoir

recours aux étoiles : c'est encore dans le ciel qu'il faut chercher une direction fixe pour les expériences de cette nature. C'est sur les flancs du Chimboraço, qui est une des plus grandes montagnes de la terre, que Bouguer fit son expérience. Il y rencontra des obstacles infinis, à cause de l'âpreté des lieux et des tempêtes terribles qu'il eut à essuyer dans ces hautes régions. Cependant il accomplit son dessein et trouva dans le fil à plomb une déviation de 7″ ou 8″. Ces montagnes volcaniques ont sans doute d'immenses cavités qui réduisent de beaucoup l'énergie de leur action.

Depuis Bouguer, on a répété les expériences en divers lieux : Maskeline, en 1772, les a surtout répétées avec de grandes précautions, au pied des monts Shéhalliens, en Ecosse, où il a trouvé une déviation de 54″. Il en résulte que certainement les montagnes agissent sur le fil à plomb, et qu'elles le dévient d'une quantité sensible, qui dépend de leur volume et de la nature des substances qui les composent. Maskeline avait fait ces expériences pour en déduire le rapport de la masse de la terre à celle de la montagne, et, par suite, la densité de la terre elle-même; il trouva de cette manière que la densité de la terre, prise dans son ensemble, est 4,56, ou à peu près quatre fois et demie la densité de l'eau. C'est, je crois, la première notion que l'on ait eue sur la nature des substances qui composent les couches centrales du globe.

57. En 1824, M. Carlini a fait des observations d'une autre espèce, qui l'ont conduit à peu près au même résultat. Il a observé le pendule au sommet du Mont-Cénis, et il a trouvé, pour sa longueur réduite au niveau de la mer, $993^{m},708$; ensuite, prenant la longueur du pendule de Bordeaux, déterminée par M. Biot, et la réduisant à la latitude du Mont-Cénis, il a trouvé 993,498. La différence est $0^{mm},210$, que M. Carlini attribue à l'action de la montagne. Le Mont-Cénis forme à peu près un segment de sphère, dont la base est la distance de Susa à Lanslebourg,

ou à peu près 11 milles géographiques, tandis que la *flèche* n'est que la onzième partie de cette distance ou un mille; d'après cela, on peut calculer son volume. Les substances qui le composent sont le marbre et le gypse, dont la densité moyenne est 2,66, ce qui permet de calculer sa masse. Avec ces élémens on peut comparer l'action de la montagne, dont on connaît le volume et la masse, à l'action de la terre, dont on ne connaît que le volume, et par conséquent on en peut tirer la densité moyenne de la terre. M. Carlini a trouvé qu'elle est de 4,39, résultat qui ne diffère guère du résultat précédent trouvé par Maskeline.

Le pendule que M. Carlini a employé était un pendule absolu, dont la boule était suspendue à la manière de Boscowich, et dont le couteau était remplacé par une petite rondelle d'acier, du poids de 19 grains, très-affilée sur ses bords, et par conséquent ne touchant le plan d'agate que par un seul point; les oscillations se faisaient perpendiculairement au plan de la rondelle.

58. Enfin, nous devons à Cavendish une autre détermination de la densité moyenne de la terre. Son appareil paraît être le plus exact que l'on puisse employer à cette recherche. La première idée de sa construction est due à Michell, de la Société royale de Londres : Michell n'ayant pas eu le temps d'achever ses expériences, et voyant sa fin approcher, légua son appareil à l'honorable *Francis-John-Hyde Wollaston*, professeur à Cambridge; et celui-ci, à son tour, en fit don à Cavendish, qui était déjà compté parmi les premiers physiciens de l'Angleterre. Voici l'idée principale sur laquelle repose ce procédé : si l'on avait une grande boule de métal de 10 pieds de rayon, il est clair qu'elle ne pourrait pas dévier le fil à plomb, puisque les montagnes ne le dévient que de quelques secondes; mais si au lieu d'un fil vertical sur lequel agit la pesanteur, on lui présentait au niveau de son centre, un levier horizon-

tal, bien équilibré et parfaitement mobile, il est clair qu'elle devrait l'attirer à elle et le faire tourner, puisque la pesanteur serait alors sans effet pour contrarier son action. Le levier horizontal serait donc une espèce de pendule, qui oscillerait par l'attraction de la boule, comme le pendule ordinaire oscille par l'action de la terre. Si même, au lieu d'une boule, on en mettait deux, agissant chacune sur l'une des extrémités du levier, on voit que l'effet serait doublé; ainsi, par ce moyen, en prenant des boules assez grosses et des leviers assez mobiles, on peut sans doute rendre sensible l'action de la matière sur la matière, et produire en petit, autour de ces sphères de métal, ce qui se produit en grand autour du globe de la terre.

L'appareil de Cavendish est représenté dans les *figures* 60 et 61. La *figure* 60 en représente la projection horizontale. S et S′ sont les deux sphères de métal; elles étaient en plomb et pesaient chacune $157^k,925$. *abcd* représente la section d'une caisse dans laquelle on avait enfermé le levier mobile pour le garantir complètement de toutes les agitations de l'air. *s* et *s′* sont deux petites balles suspendues aux deux extrémités du levier mobile et parfaitement en équilibre.

La *figure* 61 est une coupe verticale, les mêmes lettres désignent les mêmes choses; on voit ici comment les deux petites balles sont suspendues par un fil d'argent qui traverse les extrémités du levier; ce fil vient en *n* s'attacher au fil vertical *ff′* dont la ténacité est assez grande pour porter le fléau et les balles *s* et *s′*, et dont la torsion est la seule force qui s'oppose aux oscillations. Les deux masses S et S′ sont elles-mêmes suspendues par des tiges de fer, et peuvent tourner autour de la caisse; elles passent successivement des positions S et S′ figurées en lignes pleines, aux positions $S_1$, $S_1'$ figurées en lignes ponctuées : elles y sont conduites par une manœuvre qui s'exécute du dehors. Enfin tout l'appareil est enfermé dans une cham-

bre sans portes et sans fenêtres; il n'est éclairé que par une petite ouverture, au moyen d'une lampe F, placée en dehors des murs pour ne pas échauffer l'air intérieur; et c'est avec la lunette $ll'$ que l'on observe les mouvemens qui se produisent.

Tout étant en repos et les masses S et S′ étant dans la situation où elles n'agissent pas, c'est-à-dire dans la situation perpendiculaire au levier mobile, on les fait tourner pour les mettre dans la situation de la *figure* 61, alors le levier se met à tourner, les petites balles $s$ et $s'$ sont attirées chacune vers la boule correspondante, et les oscillations commencent. C'est une preuve bien irrévocable que la matière attire la matière, et que les petites balles $s$ et $s'$ tendent à tomber sur les grandes sphères de plomb, par la même puissance qui les fait tomber sur la terre, et que s'il y a une différence elle provient seulement de la différence des masses. Ce fait fondamental une fois prouvé, il ne reste plus qu'à observer la durée des oscillations des petites balles, la longueur du levier à l'extrémité duquelle elles oscillent, et leur distance au centre des grandes sphères S et S′, qui peuvent être considérées comme les centres d'attraction. Ensuite, après avoir corrigé les résultats, des effets de la torsion du fil de suspension, l'on arrive à connaître l'effet d'une sphère de plomb du poids de $157^k,925$, pour faire osciller un pendule simple d'une longueur connue, et placé à une distance connue de son centre. La question étant amenée à ce point, il n'y a plus que des proportions à faire pour avoir la masse de la terre, comparée à la masse du globe de plomb; car ces masses sont entre elles comme les longueurs des pendules simples qui battent la seconde, étant placés à une même distance de leur centre. Dans cette proportion tout est connu excepté la masse de la terre, que l'on peut par conséquent en déduire; on connaît d'ailleurs son volume par les mesures de l'arc du méridien, et en divisant la masse par le volume, on obtient

enfin sa densité moyenne. Pour dernier résultat de ces belles expériences, Cavendish trouve que la densité moyenne de la terre est de 5,48, c'est-à-dire à très-peu près cinq fois et demie la densité de l'eau.

Connaissant la densité de la terre et son volume, il est facile de trouver combien elle pèse de kilogrammes, ou plutôt combien de kilogrammes on trouverait, si l'on pouvait successivement prendre par petits fragmens, d'un mètre cube, par exemple, toutes les substances qui la composent pour les peser dans une balance, à Londres ou à Paris, et si l'on pouvait les remettre en place après les avoir pesées. Car, d'après ce que nous venons de voir sur l'attraction générale de la matière, nous pouvons être sûrs quand nous faisons une pesée, que toutes les molécules du globe contribuent à faire pencher la balance.

Par les observations et par les calculs astronomiques, on évalue les masses des planètes et celle du soleil au moyen de la masse de la terre; d'où il suit qu'avec le poids de la terre nous pouvons trouver le poids de toutes les planètes. Ainsi le petit appareil de Cavendish est une balance dans laquelle on peut peser le monde.

---

# TABLEAU DES OBSERVATIONS DU PENDULE.

| STATIONS. (1) | LATITUDES Nord—N. Sud—S. (2) | LONGUEUR du PENDULE à la station. (3) | HAUTEUR de LA STATION au dessus du niveau de la mer, en mètres. (4) | LONGUEUR du PENDULE sexagésimal réduite au niveau de la mer. (5) | NOMS des OBSERVATEURS. (6) | AVANCE ou RETARD du pendule de Paris, transporté à chaque station réduite. (7) | LONGUEUR du PENDULE SEXAGÉSIMAL, calculé par l'ensemble de toutes les observations. (8) | AVANCE ou RETARD EN UN JOUR du pendule calculé sur le pendule observé. (9) | HAUTEUR à laquelle il faudrait placer le pendule, pour qu'il fût d'accord avec le pendule calculé. (10) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | lig. | m | mm | | | | | |
| Paris | 48° 50′ 14″ N. | 440,5593 | 70 | 993,8493 | Borda | | 993,90017 | — 2″30 | + 169 |
| | | mm | | | | | | | |
| Unst | 60 45 25 N. | 742,721034 | 9 | 994,9458 | Biot | + 46″9 | 994,88706 | + 2,56 | — 188 |
| Leith | 55 58 37 N. | 742,408533 | 21 | 994,5311 | Biot | + 28,8 | 994,50960 | + 0,92 | — 68 |
| Dunkerque | 51 02 10 N. | 742,07610 | 4 | 994,0802 | Biot, Mathieu | + 9,3 | 994,09189 | — 0,50 | + 37 |
| Paris | 48 50 14 N. | 741,90112 | 70 | 993,8666 | Biot, Bouvard, Mathieu. | 00,0 | 993,90017 | — 1,43 | + 105 |
| Clermont | 45 46 48 N. | 741,61059 | 406 | 993,5822 | Biot, Mathieu | — 12,4 | 993,63055 | — 2,09 | + 154 |
| Bordeaux | 44 50 26 N. | 741,60464 | 17 | 993,4530 | Biot, Mathieu | — 18,0 | 993,54740 | — 4,11 | + 302 |
| Figeac | 44 36 45 N. | 741,56033 | 223 | 993,4578 | Biot, Mathieu | — 17,8 | 993,52721 | — 3,01 | + 222 |
| Formentera | 38 39 56 N. | 741,20540 | 203 | 992,9760 | Biot, Arago, Chaix | — 38,7 | 993,00533 | — 1,27 | + 94 |
| | | p. | | | | | | | |
| Unst | 60 45 28 N. | 39,17145 | 9 | 994,9395 | Kater | + 46,6 | 994,88712 | + 2,28 | — 168 |
| Portsoy | 57 40 59 N. | 39,16140 | 29 | 994,6906 | Kater | + 35,8 | 994,64791 | + 1,86 | — 137 |
| Leith | 55 58 41 N. | 39,15540 | 21 | 994,5354 | Kater | + 29,1 | 994,50969 | + 1,13 | — 83 |
| Clifton | 53 27 43 N. | 39,14517 | 103 | 994,3018 | Kater | + 21,1 | 994,29972 | + 0,09 | — 7 |
| Arbury-Hill | 52 12 55 N. | 39,14057 | 225 | 994,2228 | Kater | + 15,5 | 994,19348 | + 1,28 | — 94 |
| London | 51 31 08 N. | 39,13908 | 28 | 994,1232 | Kater | + 11,1 | 994,13360 | — 0,43 | + 32 |
| Shanklin farm | 50 37 24 N. | 39,13551 | 74 | 994,0468 | Kater | + 7,8 | 994,05610 | — 0,39 | + 29 |
| Paris | 48 50 14 N. | 1,00000000 | 70 | 993,8666 | Freycinet | 00,0 | 993,90017 | — 1,43 | + 105 |
| Ile Mowi | 20 52 07 N. | 0,99792769 | 1,5 | 991,7850 | Freycinet | — 90,5 | 991,66918 | + 5,06 | — 373 |
| Ile Guam | 13 27 51 N. | 0,99759268 | 2,0 | 991,4520 | Freycinet | — 105,0 | 991,30053 | + 6,63 | — 488 |
| Ile Rawak | 0 01 34 S. | 0,99709528 | 1,5 | 990,9577 | Freycinet | — 126,5 | 991,02557 | — 2,92 | + 215 |
| Ile-de-France | 20 09 56 S. | 0,99793729 | 15,5 | 991,7987 | Freycinet | — 89,9 | 991,62832 | + 7,45 | — 549 |
| Rio-de-Janeiro | 22 55 13 S. | 0,99783413 | 5 | 991,6930 | Freycinet | — 94,6 | 991,79483 | — 4,39 | + 324 |
| Port Jackson | 33 51 34 S. | 0,99876387 | 33,05 | 992,6260 | Freycinet | — 54,0 | 992,60001 | — 1,15 | — 85 |
| Cap de Bonne-Espérance. | 33 55 15 S. | 0,99871111 | 15 | 992,5677 | Freycinet | — 56,5 | 992,60504 | — 1,59 | + 117 |
| Iles Malouines | 51 35 18 S. | 1,00022130 | 6 | 994,0657 | Freycinet | + 8,6 | 994,13959 | — 3,17 | + 234 |
| Saint-Thomas | 0 24 41 N. | 39,02069 | 6 | 991,1094 | Sabine | — 119,9 | 991,02583 | + 3,64 | — 268 |
| Maranham | 2 31 43 S. | 39,01197 | 23 | 990,8932 | Sabine | — 129,4 | 991,03544 | — 6,18 | + 455 |
| Ascension | 7 55 48 S. | 39,02406 | 5 | 991,1948 | Sabine | — 116,2 | 991,12211 | + 3,16 | — 233 |
| Sierra-Leone | 8 29 28 N. | 39,01954 | 55 | 991,0953 | Sabine | — 120,7 | 991,13615 | — 1,73 | + 128 |
| Trinidad | 10 38 56 N. | 39,01879 | 6 | 991,0609 | Sabine | — 122,1 | 991,19876 | — 5,98 | + 440 |
| Bahia | 12 59 21 S. | 39,02378 | 65 | 991,2064 | Sabine | — 115,7 | 991,28180 | — 3,28 | + 242 |
| Jamaïca | 17 56 07 N. | 39,03508 | 3 | 991,4739 | Sabine | — 104,1 | 991,50653 | — 1,42 | + 104 |
| New-York | 40 42 43 N. | 39,10153 | 20 | 993,1682 | Sabine | — 30,4 | 993,18334 | — 0,63 | + 46 |
| London | 51 31 08 N. | 39,13908 | 28 | 994,1232 | Sabine | + 11,1 | 994,13360 | — 0,43 | + 32 |
| Drontheim | 63 25 54 N. | 39,17428 | 37 | 995,0200 | Sabine | + 50,1 | 995,08284 | — 2,72 | + 200 |
| Hammerfest | 70 40 05 N. | 39,19512 | 9 | 995,5405 | Sabine | + 72,7 | 995,54163 | — 0,03 | + 2 |
| Greenland | 74 32 19 N. | 39,20328 | 9 | 995,7478 | Sabine | + 81,7 | 995,73699 | + 0,50 | — 37 |
| Spitzberg | 79 49 58 N. | 39,21464 | 6 | 996,0356 | Sabine | + 94,2 | 995,93941 | + 4,19 | — 309 |
| Paris | 48 50 14 N. | 1,00000000 | 70 | 993,8673 | Duperrey | 00,0 | 993,90017 | — 1,43 | + 105 |
| Toulon | 43 07 09 N. | 0,99953725 | 3 | 993,3858 | Duperrey | — 20,9 | 993,39514 | — 0,40 | + 30 |
| Ascension | 07 55 09 S. | 0,99731962 | 5 | 991,1824 | Duperrey | — 116,8 | 991,12185 | + 2,63 | — 194 |
| Ile-de-France | 20 09 19 S. | 0,99790903 | 4,98 | 991,7682 | Duperrey | — 91,3 | 991,62773 | + 6,11 | — 450 |
| Port Jackson | 33 51 39 S. | 0,99873358 | 6,08 | 992,5879 | Duperrey | — 55,6 | 992,60012 | — 0,53 | + 39 |
| Iles Malouines | 51 31 44 S. | 1,00028461 | 6 | 994,1295 | Duperrey | + 11,4 | 994,13446 | — 0,22 | + 16 |

## OBSERVATIONS.

(3) Cette colonne contient les longueurs du pendule, telles qu'elles ont été données par les observateurs. Pour Borda, l'unité est la ligne; pour M. Biot, elle est le millimètre : mais son pendule est le pendule décimal; pour MM. Freycinet et Duperrey, l'unité est la longueur du pendule de Paris; pour MM. Kater et Sabine, l'unité est le pouce anglais.

(5) Cette colonne contient toutes les longueurs du pendule sexagésimal, exprimées en millimètres et réduites au niveau de la mer, par la formule ordinaire $\frac{2hl}{r}$. Nous devions adopter le mode uniforme de réduction, pour discuter l'ensemble des observations.

(7) Il est curieux de connaître l'avance ou le retard qu'éprouverait en un jour moyen le pendule à secondes, de Paris, en le supposant transporté successivement sur la verticale de toutes les autres stations et au niveau de la mer. C'est ce qui est exprimé dans la colonne. Le signe + indique que le pendule de Paris serait en avance, et le signe — qu'il serait en retard.

(8) Cette colonne contient les longueurs du pendule à secondes, calculées par l'ensemble de toutes les observations, en les combinant par la méthode des moindres carrés, qui donne la formule

$$l = 0{,}99102557 + 0{,}00507188 \sin^2\lambda.$$

(9) Cette colonne contient la différence qui a lieu en chaque station, entre les nombres d'oscillations que le pendule calculé et le pendule observé peuvent exécuter en un jour. On voit que ces différences sont en général assez petites, d'où il résulte que la courbure, calculée par l'ensemble des observations, représente chacune de ces observations d'une manière assez approchée. Cette courbure donne un aplatissement de $\frac{1}{282}$. La plus grande différence positive est 7″45 : elle correspond à l'Ile-de-France; c'est un fait très-remarquable, que les observations du capitaine Duperrey s'accordent, avec celles du capitaine Freycinet, à donner une différence aussi forte. S'il est permis de conclure quelque chose sur la forme de la terre au moyen des observations du pendule, il faudrait conclure qu'à l'Ile-de-France il y a dans le sol une densité locale très-considérable, ou une grande dépression de niveau. La plus grande différence négative est de—6″18; elle correspond à Maranham, qui offrirait, d'après les mêmes conséquences, un sol très-léger ou un niveau très-relevé, ou peut-être les deux circonstances à la fois. Le capitaine Sabine a, en effet, observé que Maranham est un terrain d'alluvion très-peu dense.

(10) Cette colonne contient la hauteur en mètres à laquelle s'élève en chaque lieu le niveau de la mer calculé au dessus du niveau réel, ou la profondeur à laquelle il s'enfonce. Ainsi, à l'Ile-de-France, la surface de la terre serait déprimée de 500 mètres, et à Maranham elle serait trop élevée de 455 mètres. Il résulte de cette discussion, 1°. que les observations du pendule réunies dans ce tableau offrent entre elles un accord remarquable, ce qui prouve que les observateurs ont atteint à un degré d'exactitude satisfaisant; 2° que l'aplatissement que l'on en peut déduire par la formule de Clairaut, est sensiblement plus grand que l'aplatissement $\frac{1}{305}$ donné par la théorie de la lune; 3° enfin, que la terre semble présenter en plusieurs de ses points de légères variations dans l'intensité de la pesanteur, qui tiennent sans doute à une action locale des couches de la superficie, ou à une irrégularité de forme, ou peut-être à ces deux circonstances réunies.

# CHAPITRE V.

## *De l'Hydrostatique.*

59. L'OBJET de l'hydrostatique est de déterminer les conditions d'équilibre des liquides, et les pressions qu'ils exercent sur les parois des vases qui les contiennent.

Les propriétés des liquides dépendent de deux forces : de la pesanteur qui agit sur eux comme sur tous les corps, et de l'attraction moléculaire qui agit sur eux d'une manière déterminée pour les constituer à l'état liquide. Nous pouvons distinguer par la pensée ce qui appartient à chacune de ces forces ; car nous pouvons imaginer une masse d'eau qui cesse un moment d'être pesante, sans pour cela cesser d'être liquide ; une telle masse ne pourrait plus ni tomber quand on l'abandonne, ni couler quand on la verse, et il est évident qu'elle n'aurait plus besoin pour être en repos, ni d'être soutenue sur le sol, ni d'être contenue dans un vase. Dans cet état, elle aurait encore un grand nombre de propriétés particulières qu'il serait curieux d'étudier, et parmi lesquelles la plus importante est celle qui est connue sous le nom de *Principe d'égalité de pression.*

60. *Principe d'égalité de pression.* Les liquides sont soumis au principe d'égalité de pression, c'est-à-dire qu'ils ont la propriété de transmettre dans tous les sens et également les pressions qu'on exerce à leur surface.

Ce principe est un axiome de physique ; mais s'il n'est pas nécessaire de le démontrer, il est au moins nécessaire de le faire comprendre. ABCD (*Fig.* 72) est un vase qui contient un liquide supposé sans pesanteur, P P′ est un

piston solide qui en couvre exactement toute la surface. Si le piston est aussi sans pesanteur, et s'il n'est chargé d'aucun poids, il est clair que le liquide n'éprouve aucune pression, et que l'on pourrait percer le vase sans qu'il s'écoulât; mais dès qu'on pose sur le piston un poids de 100 kilogrammes, par exemple, à l'instant il fait effort pour descendre, et descendrait en effet, si le liquide ne s'y opposait pas. Que le liquide soit compressible ou qu'il ne le soit pas du tout, le résultat est le même : il faut de toute nécessité qu'il s'anéantisse ou qu'il porte les 100 kilogrammes. La couche supérieure $aa'$ qui touche au piston et qui le soutient, en supporte donc tout le poids; et, pressée comme elle est, elle tomberait nécessairement si elle n'était pas soutenue par la couche $bb'$ qui est au dessous d'elle; elle presse sur cette couche autant qu'elle est elle-même pressée par le piston. De même la couche $bb'$ presse sur la suivante $cc'$, et ainsi de suite, la pression se communiquant de proche en proche jusqu'au fond du vase, qui est lui-même pressé comme si le piston reposait immédiatement sur lui. Puisque c'est toute la surface du fond qui porte cette pression de 100 kilogrammes, il est visible que la moitié de la surface ne porte pour sa part que 50 kilogrammes, et que la centième partie de sa surface ne porte que la centième partie de la pression totale, c'est-à-dire un seul kilogramme. Ainsi :

1°. La pression se transmet de haut en bas sur les surfaces horizontales sans rien perdre de sa force.

2°. Elle est égale en chaque point.

3°. Elle est proportionnelle à l'étendue de la surface que l'on considère.

Sur les faces latérales le même phénomène a lieu : car, si en un point quelconque on faisait une ouverture, le liquide jaillirait, et si l'on découpait une partie de la surface elle serait poussée dehors; enfin, si la portion que l'on découpe était égale à toute la lageur du piston, il ne faudrait

pas moins de 100 kilogrammes pour la tenir en place, et si elle n'avait qu'une étendue cent fois moindre, il ne faudrait qu'un effort d'un kilogramme. Si le piston lui-même était percé d'un trou, le liquide jaillirait de bas en haut, ce qui prouve que sa paroi est elle-même pressée comme le sont toutes les autres; ainsi les liquides transmettent dans tous les sens et également les pressions qu'on exerce à leur surface.

Après avoir compris ce principe pour des liquides sans pesanteur, il est facile de voir qu'il s'applique sans réserve aux liquides pesans, mais qu'alors il y a des pressions qui s'exercent sur chaque molécule, et qui résultent de la pesanteur qui leur est propre.

61. *De l'équilibre des liquides pesans.* Il y a deux conditions pour l'équilibre des liquides : il faut premièrement que les molécules supérieures et libres forment une surface perpendiculaire à la force qui les sollicite; et secondement qu'une molécule quelconque de la masse éprouve dans tous les sens des pressions égales et contraires.

*Première condition d'équilibre.* Supposons que la surface ne soit pas perpendiculaire à la force qui sollicite les meléculcs liquides, qu'elle soit par exemple dans la direction *a b c d e*, tandis que la force est dirigée suivant les verticales *v v* (*Fig.* 73). Alors une petite couche horizontale, telle que *b d*, serait pressée de tout le poids des molécules qui sont au dessus d'elle; cette pression, comme nous venons de le voir, se transmettrait latéralement, et la molécule *b*, poussée par cette pression latérale, serait poussée dehors, puisqu'il n'y a rien qui la retienne; elle sortirait donc: une autre viendrait, qui prendrait sa place, et qui serait poussée à son tour; et ainsi de suite, jusqu'à ce que la courbure *b c d* se fût affaissée, et fût devenue tout-à-fait horizontale. Il en arriverait de même de toute portion de liquide qui serait *au dessus* d'un autre point quelconque de la surface, et l'équilibre ne peut avoir lieu que

quand les molécules libres ne peuvent plus tomber, c'est-à-dire quand elles sont toutes rangées sur une même surface perpendiculaire à la force.

En appliquant ce principe à la surface de la mer, supposée parfaitement calme, il nous sera facile de prendre une idée de sa courbure et des causes qui la déterminent. Si toutes les directions de la pesanteur concouraient exactement au centre de la terre, et si cette force était la seule qui sollicitât les molécules liquides, il faudrait que dans tous les bassins de toutes les mers la surface libre des eaux prît la forme sphérique; car il n'y a que cette surface qui soit perpendiculaire à tous les rayons qui concourent en un point. Il faudrait de plus que toutes les plages fussent à la même distance du centre de la terre, car sans cela elles ne seraient pas au même niveau, et l'eau des plus élevées tomberait sur les plus bases.

C'est cette condition nécessaire de l'équilibe des masses fluides qui explique ce que nous avons annoncé dans le chapitre premier, sur la direction de la pesanteur; il faut bien que cette force soit perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles, puisque c'est elle-même qui oblige les eaux à se ranger dans cette direction,

Quand les molécules liquides sont sollicitées par quelque autre force que par la pesanteur terrestre, on conçoit que pour l'équilibre elles ne doivent plus former une surface perpendiculaire à la pesanteur seulement, mais une surface perpendiculaire à la résultante de la pesanteur et de toutes les autres forces qui agissent avec elle. Ainsi, la force centrifuge, qui résulte du mouvement de rotation de la terre, se combinant sans cesse avec la pesanteur pour solliciter tous les corps, il faut que la surface des eaux s'arrange pour être perpendiculaire à la résultante de ces deux forces, et voilà pourquoi la surface de la mer est aplatie vers ses pôles. Au pied des grandes montagnes, dont la masse est capable de dévier le fil à plomb, la sur-

face des eaux est aussi déviée de sa forme régulière; elle se soulève et s'incline sur la véritable verticale, pour se mettre perpendiculaire à la résultante des actions de la terre et de la montagne. De même encore, quand la lune passe au dessus ou au dessous de l'horizon de la mer, la force attractive qu'elle exerce sur les eaux se combine avec la pesanteur pour produire une résultante qui n'est plus verticale; et c'est ainsi que la surface mobile de l'Océan, cherchant un équilibre qu'elle ne saurait trouver, à cause du mouvement de rotation de la lune, se soulève et se déprime tour à tour, et accomplit enfin les oscillations périodiques du flux et du reflux.

Il se présente dans la nature beaucoup d'autres phénomènes qui semblent n'avoir aucun rapport avec les marées, et qui dépendent cependant d'un principe analogue: on sait, par exemple, que dans un verre ordinaire la surface de l'eau n'est pas plane dans toute son étendue, mais qu'elle se relève près des bords, comme le représente la *figure* 74; au contraire, la surface du mercure se déprime au contact des parois et semble craindre de les toucher (*Fig.* 75). C'est que la pesanteur n'est pas alors la seule force qui agisse sur les liquides; avec elle il y a deux autres forces: la force attractive que leurs molécules propres exercent l'une sur l'autre, et la force attractive qu'elles exercent sur la matière du vase. C'est à la résultante de ces trois forces que la surface liquide doit être perpendiculaire, et c'est surtout du rapport d'énergie qui existe entre les deux dernières, que dépend l'inflexion qu'elle éprouve au dessus ou au dessous de la ligne de niveau. Nous verrons sortir de ce principe toute cette classe de phénomènes qui sont connus sous le nom de *phénomènes capillaires*, et dont nous devons traiter dans un des livres suivans.

62. *Pression sur les fonds des vases et sur leurs parois latérales.* Du principe de l'égalité de pression, et de la première condition d'équilibre, dont nous venons de par-

ler, résultent plusieurs conséquences tres-importantes.

1°. La pression qui s'exerce sur le fond d'un vase est égale au poids d'une colonne liquide, qui aurait pour base le fond lui-même, et pour hauteur, la hauteur du niveau; cette vérité est frappante quand le vase est cylindrique (*Fig.* 77). Les parois latérales n'éprouvant que des pressions perpendiculaires, ne sont alors poussées ni en haut ni en bas; elles ne peuvent donc ni décharger le fond ni le surcharger, et il faut qu'à lui seul il porte toute la charge, c'est-à-dire tout le poids du liquide contenu dans le vase. Au reste, on peut le prouver aussi par l'expérience : au fond du vase cylindrique ABCD (*Fig.* 76) est un piston mobile pp′, qui peut être tiré de bas en haut par un fil assez fort; au sortir du vase ce fil passe sur des poulies, retombe verticalement, et porte à son extrémité un bassin de balance dans lequel on peut mettre des poids. D'abord on établit l'équilibre en chargeant le bassin jusqu'à ce que le piston commence à monter : cette charge est la mesure du frottement. Ensuite, ayant fixé le fil, on le charge des deux côtés; d'une part, en versant de l'eau dans le vase; de l'autre, en mettant dans le bassin un poids équivalent. Alors, laissant le fil à lui-même, on reconnaît que l'équilibre est établi, et qu'ainsi le piston est pressé ou poussé en bas par le poids de l'eau, autant qu'il est tiré en haut par le poids du bassin, qui est justement égal à celui de l'eau. Il ne faut qu'une goutte de liquide de plus pour le faire descendre, et un poids de plus pour le faire monter.

Il est évident que chaque portion du fond, que chaque centimètre carré, par exemple, porte pour sa part le poids de la colonne liquide, dont il est la base; et que la proposition dont il s'agit n'est pas seulement vraie pour le fond pris dans sa totalité, mais qu'elle est encore vraie pour une quelconque de ses parties.

On peut faire la même expérience avec un vase qui s'élargit (*Fig.* 78), ou avec un vase qui se rétrécit (*Fig.* 79):

on trouve toujours que la pression sur le fond est égale au poids de la colonne *cylindrique*, qui a pour base ce fond lui-même, et pour hauteur sa profondeur au dessous du niveau. Ainsi, dans le premier cas, la pression du fond est moindre que le poids total du liquide contenu dans le vase, et au contraire elle est plus grande dans le second cas. Ce dernier résultat a toujours quelque chose qui étonne au premier abord; on ne croit pas facilement que le liquide ABCD (*Fig.* 79) presse le fond du vase autant que le presserait ABRV. Mais, en y réfléchissant, on voit que le liquide qui serait contenu dans les parties latérales CAR et DBV ne pourrait contribuer en rien à presser sur le fond, pas plus que n'y contribuent les parties latérales CAR et DBV dans la *Fig.* 78.

Il en est de même, quelle que soit la forme du vase : pour avoir la pression sur une partie quelconque du fond; il faut toujours considérer la colonne cylindrique verticale, qui aurait pour base cette partie elle-même, et pour hauteur la hauteur du niveau. On a souvent besoin d'exprimer cette pression d'une manière générale : soit S la portion de surface horizontale que l'on considère, H, la hauteur de niveau au-dessus de cette surface, D, la densité du liquide; la pression sera exprimée par SHD : car SH est le volume de la colonne liquide, et, pour avoir le poids, il faut multiplier le volume par la densité.

Ainsi, avec un litre d'eau qui pèse un kilogramme, on peut exercer sur le fond d'un vase une pression très-petite, et l'on peut exercer aussi une pression infiniment grande. Pour que la pression soit d'un kilogramme, par exemple, il suffit de prendre un vase cylindrique de base quelconque, la pression totale sera toujours égale au poids du liquide, et par conséquent toujours un kilogramme; seulement la pression sur chaque centimètre carré du fond sera plus petite ou plus grande, suivant que le vase sera plus large ou plus étroit.

Pour que la pression soit de $\frac{1}{10}$ de kilogrammes, il suffit de prendre un vase dont la base soit par exemple un décimètre carré, et qui soit tellement évasé, que le litre d'eau n'y prenne que $\frac{1}{10}$ de décimètre, ou un centimètre de hauteur.

Pour que la pression soit de 10 kilogrammes, il suffit de prendre un vase dont la base soit par exemple d'un décimètre carré, mais tellement rétréci, que le litre d'eau y prenne une hauteur de 10 décimètres, ou d'un mètre.

Avec le même poids de 1 kilogramme, il serait tout aussi facile d'exercer une pression de $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$, etc. de kilogramme, ou une pression de 100, 1000, etc., kilogrammes.

Voici un autre appareil au moyen duquel on peut beaucoup plus facilement démontrer cette propriété fondamentale des liquides : il se compose d'un tube horizontal de fer ou de cuivre (*Fig.* 80), relevé perpendiculairement à ses deux extrémités. D'une part, il se termine par un réservoir de quelques pouces de largeur, sur lequel on peut visser des vases de toutes formes, ayant le même fond; de l'autre part, il se termine par un tube en verre de quelques lignes de diamètre, et sur lequel on peut faire glisser un index. On y verse du mercure, et le point où il s'arrête dans la petite branche est la première position de l'index; ensuite, après avoir vissé sur le réservoir un des vases que l'on veut soumettre à l'expérience, on le remplit d'eau jusqu'à une hauteur connue; la pression qui en résulte fait monter le mercure dans la petite branche, et on note le point où il s'arrête. Un second vase d'une toute autre forme est substitué au premier; on fait sur lui la même expérience, en y versant de l'eau jusqu'à la même hauteur, et l'on voit toujours que dans la petite branche le sommet de la colonne de mercure vient s'arrêter au même point. Donc, quelle que soit la forme des vases, les liquides qu'ils contiennent exercent la même pression sur leurs fonds, quand le niveau est le même. Cet ingénieux appareil est de l'invention de

M. de Haldat, professeur de physique et de médecine à Nancy; M. Legrand, élève distingué de l'École normale, avait eu aussi la même idée.

Ce n'est pas seulement sur les fonds des vases que s'exercent les pressions verticales des liquides; elles s'exercent encore sur tous les points de l'intérieur de la masse, et se communiquent de toutes parts en vertu du principe de l'égalité de pression; il en résulte un phénomène fondamental qu'il importe de faire comprendre. Concevons, dans l'intérieur de la masse liquide, une couche $mm'$ (*Fig.* 81), qui soit parallèle à la surface de niveau $nn'$ : toutes les molécules qui composent cette couche sont évidemment pressées par tout ce qui est au dessus d'elles; elles sont comme si elles supportaient un piston d'un poids égal au poids du cylindre liquide $nn'\,mm'$. Seulement, cette pression qu'elle éprouve de haut en bas, se transmet de bas en haut par le principe d'égalité de pression, et chacune de ses molécules n'est en équilibre que par la simultanéité de ces pressions contraires. Ainsi, en ne considérant qu'une portion $ab$ de cette couche, il faut bien comprendre que la surface $ab$ est à la fois pressée de haut en bas par la colonne liquide $dabc$, et de bas en haut par une force exactement égale; tellement que, si un cylindre solide était plongé dans l'eau, et que sa base vînt s'appuyer sur la surface $ab$, cette pression de bas en haut agirait sur le cylindre et tendrait à le pousser dehors.

Cette conséquence se vérifie par l'expérience suivante : $vv'\,rr'$ (*Fig.* 82) est un tube de verre un peu épais, qui est bien *dressé* à son extrémité inférieure; $tt'$ est un disque de verre dépoli, qui est pareillement plan, et qu'on appelle un *obturateur;* il est attaché par un fil qui passe dans le tube, en sorte qu'en tirant le fil l'obturateur vient fermer le tube; on le ferme ainsi et on le plonge dans l'eau. Alors il n'est plus nécessaire de tirer le fil pour empê-

cher que l'obturateur ne tombe, parce qu'il est repoussé en haut par toute la pression de bas en haut qui s'exerce sur sa surface; et cette pression est égale à celle qu'il supporterait de haut en bas s'il était seul plongé dans l'eau à la même profondeur. Pour en donner la preuve, on verse de l'eau dans le tube : dès que le niveau intérieur approche du niveau extérieur *nn'*, l'obturateur est poussé de haut en bas, autant qu'il était repoussé de bas en haut, et l'on voit en effet qu'il tombe par son propre poids.

Ainsi, au fond d'un bateau, si l'on faisait une ouverture, l'eau jaillirait à l'instant, et pour l'empêcher d'entrer il faudrait exercer une pression qui fût égale au poids d'une colonne d'eau, ayant pour base l'ouverture, et pour hauteur la profondeur du bateau au dessous du niveau. C'est pour cela que, dans les grands vaisseaux, la quille doit avoir une grande force pour résister aux pressions de bas en haut qui s'exercent sur le fond du bâtiment. Si ce fond était horizontal, et qu'il eût par exemple 100 mètres carrés de superficie, la pression ne serait pas moindre que cent mille kilogrammes, quand le *tirant* serait d'un mètre, et que trois cent mille kilogrammes, quand il serait de trois mètres.

Nous pouvons juger par là des énormes pressions qui s'exercent dans les lacs et dans les mers, et de celles qui sont supportées par tous les élémens chimiques qui s'y trouvent, et par tous les corps vivans qui en peuplent les profondeurs. Nous reviendrons sur ce sujet dans le chapitre suivant.

2°. La pression que supporte une paroi latérale est égale au poids d'une colonne liquide qui aurait pour hauteur verticale la profondeur du centre de gravité de la paroi au dessous du niveau, et pour base horizontale une surface égale à la paroi elle-même.

Les pressions latérales se déduisent des pressions hori-

zontales correspondantes au moyen du principe d'égalité de pression : le point $m$ (*Fig.* 81) faisant partie de la couche horizontale $mm'$, cette couche lui transmet la pression qu'elle supporte elle-même; elle la transmet dans tous les sens, et par conséquent le point $m$ la reçoit dans la direction perpendiculaire à la paroi dont il fait partie. Ainsi, chaque étendue d'une paroi latérale éprouve la même pression qu'une égale étendue de la couche horizontale qui lui correspond, c'est-à-dire que SHD représente aussi les pressions latérales : seulement la surface S doit toujours être assez étroite en hauteur pour que la pression soit sensiblement la même dans toute son étendue. Dans une cuve d'eau de 10 mètres de hauteur, la pression sur un centimètre carré de la paroi latérale est donc 100 grammes à 1 mètre de profondeur; elle est de 200 grammes à 2 mètres, et d'un kilogramme à 10 mètres, c'est-à-dire tout-à-fait au fond.

Pour avoir la somme des pressions latérales supportées par une paroi plane, qu'elle soit triangulaire, polygonale, ou de forme quelconque, on voit qu'il suffit de trouver la résultante d'un système de forces qui sont toutes parallèles, mais qui croissent proportionnellement à la profondeur, et aussi proportionnellement à l'étendue horizontale de la portion de paroi que l'on considère. C'est par cette composition de forces qu'on arrive, pour les pressions latérales, au théorème général que nous venons d'énoncer.

63. *Centre de pression.* — Le point d'application de la résultante de toutes les pressions élémentaires est ce qu'on appelle le *centre de pression*; il est toujours placé plus bas que le centre de gravité, puisqu'il coïnciderait avec lui, si les forces n'allaient pas en croissant à mesure que l'on descend. Dans une paroi qui a la forme d'un parallélogramme, le centre de pression est sur la ligne qui divise en deux parties égales les côtés horizontaux, et à $\frac{1}{3}$ de sa hauteur en partant du fond. Dans une paroi triangulaire dont la base

est au fond, il est au quart d'une ligne analogue, et au contraire, quand la base est à fleur d'eau, il est à moitié.

64. *Deuxième condition d'équilibre.* — La seconde condition d'équilibre est qu'une molécule quelconque de la masse éprouve dans tous les sens deux pressions égales et contraires. Il est évident que cette condition est nécessaire, et il n'est pas moins évident qu'elle est suffisante pour l'équilibre de l'intérieur, comme la première est suffisante pour l'équilibre de la surface. Essayons de donner un exemple qui en fasse mieux comprendre la nécessité. Supposons que dans le vase ABCD (*Fig.* 83), on eût arrangé, pour un moment, de l'eau et du mercure de telle sorte que les surfaces D*m* et *m*C fussent bien nivelées, et que la surface de jonction des deux liquides fût L*m*. La première condition d'équilibre serait remplie, et cependant l'équilibre n'aurait pas lieu; car au point *o*, par exemple, les pressions latérales et opposées ne seraient pas égales; celle du mercure étant la plus forte, les molécules de ce liquide tomberaient au fond et s'y mettraient de niveau. En général, divers liquides étant mêlés dans le même vase, ils s'arrangeront nécessairement de telle sorte, que chacun d'eux ait sa surface horizontale; c'est le seul arrangement qui puisse remplir la seconde condition d'équilibre. Ensuite il y aura stabilité, si les plus lourds sont en bas, suivant l'ordre de leur densité; mais s'ils n'y sont pas, on n'aura qu'un équilibre instable; au moindre choc les surfaces de jonction cesseront d'être planes, elles deviendront ondulées; les pressions ne seront plus égales dans tous les sens, et les liquides plus légers seront poussés en haut, tandis que les plus lourds viendront prendre la place qui convient à leur densité. C'est pour cela que de l'huile, battue avec de l'eau, s'en sépare avec le temps, et vient à la surface où l'appelle sa densité; et le même phénomène se reproduit dans tous les mélanges de liquides différens, lorsqu'il n'y a pas une

affinité chimique qui combine entre eux tous les élémens, et qui leur donne une densité commune.

65. *Vases communiquans.* — Lorsque plusieurs vases communiquent entre eux, quels que soient leur nombre et leur forme, les liquides qu'ils contiennent sont, pour l'équilibre, soumis aux deux conditions que nous venons d'établir. Ainsi, quand c'est le même liquide qui remplit tous les vases, il faut, par la première condition, que toutes les surfaces soient *de niveau*, et par la seconde, qu'elles soient *de même niveau*; car sans cela les couches de niveau de l'intérieur de la masse ne seraient pas également pressées dans toute leur étendue. En effet, dans le vase (*Fig.* 84), si le niveau de la grande branche était par exemple en $ab$, au lieu d'être en NN′, sur la même ligne que $nn'$, la couche de niveau CC′ $cc'$ ne serait pas également pressée en CC′ et en $cc'$, et l'équilibre n'aurait pas lieu, puisqu'une couche de niveau quelconque doit toujours être également pressée dans toute son étendue.

Quand les liquides sont différens, il faut que les surfaces aient des niveaux différens.

Dans le vase représenté *figure* 85, il y a de l'eau dans la grande branche et du mercure dans la petite; les liquides se touchent en $g$, et on mène l'horizontale $gh$. Si les sections $g$ et $h$ n'avaient rien au dessus d'elles, l'équilibre aurait lieu; ainsi, pour l'équilibre, il faut que sur chaque point de leur étendue elles soient également pressées, l'une par l'eau, et l'autre par le mercure. Or une portion S de la section $hg$ supporte une pression S HD, en désignant par H la hauteur de l'eau au dessus de $g$, et par D sa densité; de même, une égale portion de la section $h$ supporte S D′ H′, H′ étant la hauteur du mercure au dessus de $h$, et D′ sa dansité. Il faut donc que l'on ait $S \times HD = S \times H'D'$, ou $\frac{H}{H'} = \frac{D'}{D}$; c'est-à-dire que les hauteurs au dessus du point de jonction des liquides sont entre elles en raison inverse des densités :

ainsi, un pouce de mercure fait équilibre à peu près à 14 pouces d'eau. La jonction des surfaces pourrait bien ne pas se faire sur une ligne horizontale, comme, par exemple, si on versait assez d'eau dans le vase pour refouler la colonne de mercure jusqu'en *s i*; mais alors on conçoit que dans cette section, si les pressions latérales sont égales, de chaque côté, sur les molécules qui sont au centre et dans l'axe du tube, elles ne peuvent plus l'être pour les molécules qui sont au dessus ou au dessous. Au bord supérieur en s, la pression de l'eau l'emporte, et au contraire au bord inférieur en *i*, c'est la pression du mercure; la surface de jonction tend à prendre la figure *s' i'*, et l'eau finit par passer dans la petite branche, et le mercure dans la grande, jusqu'à ce qu'enfin il s'établisse un autre équilibre.

Dans les tubes qui ont moins d'une ligne d'ouverture, cet effet ne se produit pas; les colonnes sont trop étroites pour se *diviser*, la cohésion des molécules de chaque liquide suffit pour résister à l'inégalité de pression qui existe entre le bord supérieur et le bord inférieur.

66. *Du niveau des mers.* — Les principes de l'hydrostatique ne trouvent pas seulement leur application dans les tubes et dans les vases étroits, sur lesquels nous pouvons expérimenter; mais ils s'appliquent pareillement à tous les liquides qui sont répandus dans la nature.

C'est par les lois précédentes, que toutes les eaux de la terre sont nivelées dans les bassins profonds de la mer, et que leur vaste surface conserve tout autour du globe une forme permanente; si elle est soulevée par les tempêtes, elle est ramenée par l'équilibre dans les limites qui lui sont assignées.

Si la terre était immobile et formée de couches homogènes, nous avons vu que la surface des mers serait rigoureusement sphérique; les navigateurs qui passent sous la ligne, ceux qui parcourent des plages inconnues, dans l'un ou dans l'autre hémisphère, et ceux qui visitent les côtes

du Groënland, ou les mers encore plus voisines du pôle, se trouveraient tous en même temps à la même distance du centre de la terre; les choses seraient ainsi par les lois de l'hydrostatique, et par la structure des parties solides du globe, qui n'offrent à la surface que des saillies insensibles. De grandes inégalités dans les parties solides troubleraient la sphéricité des surfaces liquides : si la chaîne des Cordillières était seulement cent fois plus haute, les eaux seraient montantes sur les côtes de l'Amérique, vers l'Orient comme vers l'Occident; elles seraient descendantes sur les côtes opposées, et les ports de France seraient à sec, aussi bien que ceux du Japon.

Si la terre était immobile, et composée à l'extérieur de parties hétérogènes d'une densité très-inégale; si, par exemple, au dessous de l'Océan, entre la croûte qui lui sert de fond et le centre de la terre, il se trouvait d'immenses cavernes qui fussent vides ou remplies de substances de faible densité, il est clair que l'intensité de la pesanteur serait beaucoup moindre sur les eaux de l'Océan que sur celles des autres mers, et qu'alors la surface générale des eaux, au lieu d'être sphérique de toutes parts, devrait être renflée dans quelques endroits, et dans d'autres déprimée. Ainsi, une hétérogénéité de substances pourrait à elle seule produire des irrégularités de forme, et si à cette cause on ajoute l'influence de la force centrifuge, on voit que la question devient encore plus compliquée. Dans l'ignorance où nous sommes sur la composition intérieure du globe, dont, avec toute notre puissance, nous ne pouvons fouiller qu'une superficie d'une profondeur insensible, les seuls moyens que nous ayons de trouver la véritable forme de la surface des mers sont les opérations géodésiques et les observations du pendule. Par le premier moyen nous arriverons à la connaissance du fait, indépendamment de toute hypothèse et de toute explication; et par le second moyen, nous arriverons peut-être à découvrir quelques lois

générales de la structure intérieure de la terre, ou du moins quelques-unes des causes locales qui peuvent altérer la régularité de sa surface. L'équilibre des eaux dépend de la direction de la pesanteur, et les oscillations du pendule dépendent de l'intensité de la même force; il est difficile de démêler *à priori* jusqu'à quel point ces deux élémens sont liés entre eux, et jusqu'à quel point ils peuvent se déterminer l'un par l'autre; et c'est ce qui donne encore plus d'importance aux recherches qui ont pour objet de les déterminer avec exactitude.

Presque tous les bassins des mers communiquent de diverses manières, soit par de larges canaux, soit par des détroits plus ou moins resserrés; et les eaux dans ces différens bassins sont soumises aux conditions d'équilibre des vases communiquans. Seulement, il faut observer que l'eau de la mer n'est point un liquide homogène dans toute l'étendue de sa masse, la température change avec la latitude, et elle change aussi avec la profondeur; le degré de salure change pareillement; toutes ces causes font varier la densité dans les différens lieux, et de là il résulte une foule de mouvemens par lesquels l'équilibre tend à s'établir. L'eau de l'Océan afflue dans la mer Méditerranée par le détroit de Gibraltar; un courant rapide en est la preuve : mais on ne sait pas si par un courant contraire, qui aurait lieu à une plus grande profondeur, l'eau de la Méditerranée ne passe pas dans l'Océan. Si ce second courant existe, ils sont sans doute produits l'un et l'autre par la différence de densité des couches; s'il n'existe pas, il faut supposer que la Méditerranée perd par l'évaporation, ou par d'autres causes, plus d'eau qu'elle n'en reçoit par le Nil, le Rhône, le Danube, et tous les fleuves qui s'y jettent, et que l'Océan vient compenser cette perte pour la tenir à la hauteur voulue pour l'équilibre.

Voici les résultats qui ont été obtenus jusqu'à présent,

sur le nivellement des mers. Pendant l'expédition d'Égypte, une commission d'ingénieurs, sous la direction de M. Le Père, a déterminé les hauteurs relatives de la mer Rouge et de la mer Méditerranée. Cette opération mérite une assez grande confiance; et, pour résultat, elle donnne une différence de niveau très-remarquable entre ces deux mers, qui sont si voisines près de l'isthme de Suez et qui d'ailleurs communiquent par l'Océan. Aux mers basses la mer Rouge est encore élevée de $8^m,12$ au dessus de la mer Méditerranée, et dans les hautes mers son excès de hauteur s'élève à $9^m,9$. Ainsi se trouve confirmée l'opinion des anciens sur les dangers d'ouvrir une communication entre les deux mers. Aujourd'hui, une grande partie du sol de l'Égypte serait encore submergée par la mer Rouge, et cependant le lit du Nil et le sol de l'Egypte s'élèvent sans cesse par le dépôt de limon que laisse chaque inondation. M. Girard a fait de très-curieuses recherches sur ce sujet : en prenant la hauteur actuelle des crues, aux nilomètres d'Éléphantine et de l'île de Rondah, et en la comparant à ce qu'elle était autrefois, il trouve la mesure de l'exhaussement du sol, et il l'évalue à 126 millimètres par siècle. A ce compte, il faudrait encore bien des siècles pour que la Basse-Egypte fût seulement au niveau de la mer Rouge.

Dans l'opération de la méridienne de France, M. Delambre a calculé la hauteur de Rhodez au dessus du niveau de la mer Méditerranée à Barcelonne, et sa hauteur au dessus du niveau de l'Océan, qui baigne le pied de la tour de Dunkerque; ces deux hauteurs sont égales entre elles à une fraction de mètres près, d'où il suit que, s'il existe quelque différence de niveau entre la mer Méditerranée à Barcelonne, et l'Océan à Dunkerque, cette différence est du moins très-petite.

M. de Humboldt, dans son voyage en Amérique, a fait sur les côtes de l'Océan Atlantique et sur les côtes de la

mer du Sud, des observations du baromètre, d'où l'on peut tirer quelque connaissance sur la hauteur relative de ces deux mers. Des moyennes barométriques prises d'une part à Carthagène, à Cumana et à Vera-Cruz, sur la côte orientale du Mexique; et d'une autre part, au Callao et Acapulco, sur les bords de la mer du Sud, il résulterait que la mer du Sud serait plus élevée que l'Océan d'environ 7 mètres. D'autres observations de M. de Humboldt donneraient une différence un peu plus grande : mais ce célèbre voyageur ne donne les résultats précédens que comme une première approximation, supposant que les inégales hauteurs des marées, les heures différentes des établissemens des ports, et l'étendue plus ou moins grande des variations horaires du baromètre, sont autant de causes qui peuvent avoir une influence dans des mesures aussi délicates.

Le niveau de la mer Caspienne a été l'objet de plusieurs recherches récentes. Il a été déterminé, en 1815, par MM. d'Engelhardt et Parrot, dans leur curieux voyage au Caucase et en Crimée; il l'a été, en 1818, par M. Pansner; et vers cette même époque, M. Wisniewski a publié, dans les *Mémoires de Pétersbourg*, la série des observations qu'il avait faites dans le même but dès l'année 1812. Toutes ces mesures s'accordent à placer le niveau de la mer Caspienne de beaucoup au dessous du niveau de la mer Noire : d'après le résultat moyen, on peut estimer cette différence à 100 mètres ou à environ 300 pieds. Cependant près des bords de la mer Caspienne, et jusqu'à une grande distance de ses rivages actuels, on retrouve des preuves frappantes du séjour des eaux salées. La nature du sol, sa forme et sa composition chimique, les débris de coquilles et les squelettes de poissons dont il est rempli, ne semblent laisser aucun doute que la mer autrefois n'ait couvert toutes ces steppes, à plusieurs centaines de lieues de distance. Comment s'est produite la dépression

de niveau que l'on observe aujourd'hui? Qu'est devenue cette masse d'eau qui manque et que l'on peut estimer à un volume de 30,000 lieues carrées de superficie sur une centaine de mètres de hauteur? Voilà des problèmes dont on cherchera long-temps encore la solution; car ils tiennent à la géologie générale, et peut-être aux grandes catastrophes dont le Caucase a été le théâtre.

67. Le mélange des eaux des fleuves avec les eaux de la mer présente aussi quelques phénomènes d'hydrostatique qu'il est assez curieux d'observer. L'eau douce étant plus légère, doit se tenir à la surface, tandis que l'eau salée doit, par sa pesanteur, former les couches les plus profondes. C'est, en effet, ce que M. Stevenson a observé en 1816 dans le port d'Aberdeen, à l'embouchure de la Dee, et aussi de la Tamise, près de Londres et de Wolwich. En puisant de l'eau à diverses profondeurs avec un instrument imaginé pour cet objet, M. Stevenson a trouvé qu'à une certaine distance de l'embouchure, l'eau est douce dans toute la profondeur, même à la marée montante; mais que si l'on descend le cours de la rivière et que l'on approche un peu plus près de la mer, on trouve l'eau douce à la surface, tandis que l'eau de la mer forme les couches du fond. D'après ses observations, c'est entre Londres et Volwich que pour la Tamise la salure du fond commence à être sensible. Ainsi, au-dessous de Wolwich, cette rivière, au lieu de couler sur un fond solide, coule véritablement sur le fond liquide formé par les eaux de la mer, avec lesquelles sans doute elle se mêle plus ou moins. Cependant M. Stevenson est d'opinion qu'à la marée montante les eaux douces sont soulevées pour ainsi dire *tout d'une pièce* par les eaux salées qui affluent et qui remontent le lit du fleuve, tandis que l'eau douce continue de couler vers la mer.

Ces expériences tendent à confirmer l'opinion que Franklin avait émise sur ce sujet, dès l'année 1761. « Si quel-

ques rivières, dit-il, se rendent dans des lacs, sans que cependant ceux-ci débordent jamais, c'est que les eaux se répandent alors sous une surface tellement grande, que l'évaporation enlève journellement une masse de liquide à peu près égale à celle qui afflue; mais il est des fleuves qui, par l'étendue de leur cours et la largeur de leur embouchure, peuvent être assimilés à des lacs. Pour que la ressemblance fût parfaite, il suffirait qu'une digue arrêtât le cours des eaux et les empêchât de se rendre à la mer : on trouverait bien alors, suivant les saisons, quelques différences de niveau; mais on conçoit en général que, sous certaines circonstances, ces différences pourraient être renfermées dans des limites assez resserrées. Quoique la communication entre la rivière et la mer soit ouverte, on peut supposer que la digue dont nous venons de parler existe réellement dans la surface de jonction de l'eau douce et de l'eau salée. Seulement cette digue sera mobile; elle remontera d'un certain nombre de lieues à la marée montante, et redescendra ensuite : l'amplitude des excursions pourra varier avec le volume des eaux. Dans quelques cas, on devra aussi s'attendre à trouver que l'eau de la mer et celle de la rivière se mêlent en se rencontrant, et dans une étendue plus ou moins considérable, par le double effet de leurs mouvemens et de la différence des pesanteurs spécifiques; mais, à une certaine distance de l'embouchure, l'eau douce, d'abord entraînée par le courant et refoulée ensuite par la marée, oscillera à peu près dans les mêmes limites et sans jamais atteindre la mer. L'ignorant imaginerait que les eaux coulent et se perdent en partie sous quelques crevasses de la terre, tandis qu'en réalité c'est par l'air qu'elles s'échappent.

---

## CHAPITRE VI.

*De l'équilibre des gaz et des pressions atmosphériques.*

68. L'air est un corps qui ne tombe pas immédiatement sous nos sens comme les corps solides ou les liquides ; mais il se manifeste à nous par tant de phénomènes sur la terre et sur les eaux , qu'il n'est pas nécessaire de chercher d'autres preuves de son existence. Il y a des orages dans tous les climats et des tempêtes sur toutes les mers : ainsi le fluide de l'air enveloppe toute la surface du globe. Il forme partout une couche d'une grande épaisseur ; car dans tous les pays, sur les montagnes , comme dans les plaines , on voit flotter des nuages qui sont emportés par le vent, et au dessus de ces nuages on voit la couleur brillante du ciel, qui est une preuve de la profondeur de l'air, comme la couleur de l'Océan est une preuve de la profondeur de l'eau. S'il n'y avait pas d'air, le ciel serait sans éclat et sans couleur; il paraîtrait comme une voûte absolument noire, où l'on verrait les astres briller pendant le jour avec le même éclat que pendant la nuit. Cette grande masse d'air, qui est répandue tout autour de la terre, et dont les couches superposées s'élèvent plus haut que les plus hautes montagnes, est ce que l'on nomme l'*atmosphère*. Le sommet le plus élevé de l'Himâlaya ne s'élève pas à deux lieues au dessus du niveau de la mer, et nous verrons que l'atmosphère s'élève à plus de douze à quinze lieues.

Les découvertes chimiques du dernier siècle nous ont fait connaître plusieurs corps , qui sont différens de l'air par leur nature , mais qui sont analogues à l'air par leur trans-

parence, par leur fluidité et par l'ensemble de leurs propriétés physiques. Tous ces corps ont reçu différens noms : d'abord on les appelait des *airs*, et l'on disait alors : *air méphitique, air inflammable, air hépatique, air fixe, air phlogistiqué, déphlogistiqué*, etc. ; aujourd'hui tous ces corps sont ce que l'on appelle les *gaz* ou les *corps gazeux* ou les *fluides élastiques*.

69. Les gaz sont soumis à deux espèces de forces, comme les solides et les liquides ; savoir : à la force de la pesanteur et aux forces moléculaires.

70. La pesanteur de l'air, qui avait été soupçonnée autrefois, même avant Aristote, n'a été véritablement démontrée qu'en 1640 par Galilée, et un peu plus tard elle a été confirmée par les belles expériences de Toricelli et par les expériences encore plus frappantes de Pascal. Cette vérité fondamentale peut se démontrer directement par l'expérience suivante : on fait le vide dans un grand ballon, au moyen de la machine pneumatique ; on le suspend à l'un des bras de la balance, et de l'autre côté on met des poids pour établir l'équilibre. Si après cela on ouvre un instant le robinet pour laisser rentrer un peu d'air, l'équilibre est rompu, la balance penche du côté du ballon, et il faut ajouter des poids dans l'autre bassin ; si l'on rouvre le robinet encore pendant un instant, il arrive encore une augmentation de poids ; et enfin, si on laisse rentrer l'air complètement, on trouve que pour rétablir l'équilibre il a fallu ajouter dans l'autre bassin une somme de poids très-sensible. Pour un ballon de 10 litres la différence des poids est de plus de 10 grammes ; ce qui prouve déjà, par une première approximation, que 1 litre d'air dans les circonstances ordinaires pèse un peu plus de 1 gramme, c'est-à-dire que l'eau n'est pas mille fois plus pesante que l'air ordinaire à Paris.

71. Les forces moléculaires agissent dans les gaz tout autrement que dans les solides et dans les liquides. Nous avons

vu que ces forces retiennent les molécules des solides fortement pressées les unes sur les autres, et fixement arrêtées à leur place; qu'elles retiennent aussi les molécules des liquides, tout en leur laissant une grande liberté de se mouvoir dans tous les sens; mais dans les gaz les forces moléculaires sont répulsives, et toutes les molécules, cédant à l'action de ces forces, tendent sans cesse à s'éloigner les unes des autres, et s'éloignent en effet jusqu'à ce qu'elles rencontrent des obstacles qui les arrêtent. Ainsi, l'air qui est renfermé dans un vase, fait sans cesse un effort contre les parois pour les presser et les repousser plus loin, et il faut toujours ou que les parois éclatent sous cette pression, ou qu'elles soient assez fortes pour y résister. Cette conséquence semble d'abord impossible, car s'il est vrai que dans un vase fermé, l'air fasse un tel effort contre les parois, il semble nécessaire que cet air s'échappe par la moindre ouverture, et qu'il s'échappe à plus forte raison à l'instant où l'on ouvre le vase, ou même avant que l'on ait eu le temps de le fermer. D'où il s'ensuivrait que tous les vases sont vides d'air, tandis que l'on sait bien qu'ils en sont tous remplis, à moins que l'on n'y verse de l'eau ou quelque autre liquide. Pour lever cette difficulté, imaginons un vase de 1 litre de capacité, par exemple, et fermé de toutes parts : s'il était vide et que l'on y fît une ouverture, l'air extérieur se précipiterait à l'instant pour le remplir; au contraire, s'il était plein, que l'on en perçât les parois et qu'il n'y eût pas d'air au dehors, l'air intérieur sortirait à l'instant; mais quand il y a de l'air au dehors comme au dedans, l'air extérieur fait pour entrer dans le vase autant d'effort que l'air intérieur pour en sortir, et, entre ces deux pressions égales, l'équilibre subsiste aux points où le vase est ouvert, comme aux points où il est fermé par des parois. C'est donc l'air extérieur qui arrête la force répulsive de l'air intérieur.

Cette propriété est si remarquable qu'il est bon de le démontrer par une expérience directe. Sous le récipient de

la machine pneumatique on met une vessie à moitié pleine d'air, on donne quelques coups de piston, et on voit la vessie qui se gonfle de plus en plus jusqu'à prendre tout le volume dont elle est susceptible; elle se tend comme si on y soufflait de l'air avec une grande force. On voit donc que l'air intérieur qu'elle contient faisait un effort pour repousser les parois, puisqu'il les repousse en effet, dès que, par le jeu de la machine, on enlève l'air du récipient qui arrêtait cet effort. Au lieu d'une vessie on pourrait mettre sous le récipient un vase de verre très-mince, fermé par un bouchon; alors en faisant le vide comme tout à l'heure, on verrait sauter le bouchon ou bien peut-être le vase se briserait. Cette pression, que l'air exerce contre les parois des vases qui le contiennent, est ce que l'on nomme *son élasticité* ou *sa force élastique*, ou *sa tension*.

Un ressort ne devient élastique que quand on le comprime, et il perd sa tension dès qu'il est revenu à son état primitif; mais l'air est toujours dans un état actuel de tension; il n'y a point pour lui de volume primitif, puisqu'il tend sans cesse à occuper un volume plus grand. Un litre d'air ordinaire serait versé dans un espace vide, de plusieurs milliers de mètres cubes de capacité, qu'il se répandrait partout dans cet espace, et qu'il en presserait les parois dans tous les sens, faisant encore un effort pour se répandre plus au large. On conçoit d'après cela combien il importe d'étudier les effets de l'air atmosphérique, car sa seule présence est une force active dans tous les phénomènes que nous observons.

72. *Conditions d'équilibre de l'air.* — Il n'y a pour les gaz qu'une seule condition d'équilibre; savoir, que leur force élastique soit la même dans toute l'étendue d'une couche de niveau. Cette condition est analogue à la seconde condition d'équilibre des liquides (64), et elle se déduit des mêmes principes : savoir, de la mobilité de molécules et de l'action de la pesanteur qui s'exerce sur elles. Dans un vase

quelconque (*Fig.* 86) tous les points de la couche horizontale $cc'$ doivent avoir la même élasticité, car il faut que la force répulsive des molécules qui sont en $b$, puisse arrêter la force répulsive des molécules qui sont en $b'$; et ces forces ne peuvent s'arrêter et se faire équilibre, à moins qu'elles ne soient égales dans tous les points de la couche horizontale $cc'$. Il en est de même dans toutes les sections de niveau que l'on peut concevoir, soit au dessus, soit au dessous de $cc'$; mais il est évident que la couche $mm'$, par exemple, est plus pressée que $cc'$, puisqu'elle supporte d'abord toute la pression qui s'exerce en $cc'$, et qui lui est transmise par le principe d'égalité de pression; et qu'en outre elle supporte encore tout le poids de l'air qui est compris dans la colonne $cmm'c'$ et qui pèse librement sur elle comme une colonne d'eau pèse sur le fond d'un vase.

Les conditions de la stabilité et de l'instabilité de l'équilibre sont aussi les mêmes que dans les liquides, et pour les mêmes raisons; l'équilibre est stable quand la densité de l'air inférieur est plus grande que celle de l'air supérieur, et il est instable quand le contraire a lieu. Mais l'équilibre instable, quoique mathématiquement possible, est toujours physiquement impossible, à cause de la grande mobilité des molécules des gaz.

Cette loi de l'équilibre de l'air est une loi universelle pour toutes les masses gazeuses, quelque petites ou quelque grandes qu'elles puissent être. Elle s'applique à l'air contenu dans un grand édifice comme à celui qui est contenu dans un vase de petites dimensions; elle s'applique à toute la colonne d'air atmosphérique qui repose sur une vaste plaine, et elle s'applique enfin à la masse entière de l'air qui constitue l'atmosphère. Que l'on conçoive à une hauteur quelconque, à la hauteur du Mont-Blanc, par exemple, une couche atmosphérique qui enveloppe la terre, et qui soit parallèle à la surface des eaux, il faudra pour l'équilibre que tous les points de cette couche sup-

portent partout la même pression, à Paris comme aux antipodes, sur les continens comme sur les mers, et dans les régions des pôles comme dans celles de l'équateur. Une seconde couche parallèle à celle-là, mais qui serait à cent mètres au dessous, devrait, par la même raison, avoir tous ses points également pressés entre eux, et tous se trouveraient plus pressés que ceux de la première couche, du poids entier de la colonne d'air de cent mètres qu'ils supportent de plus. Ainsi, à hauteur égale, la pression doit être égale, mais elle diminue à mesure que l'on s'élève. La nécessité d'une pression uniforme dans une si grande étendue fait assez comprendre que dans l'océan de l'air tout équilibre est impossible. Un calme universel est incompatible avec tant de mobilité, puisqu'un seul point ébranlé met toute la masse en agitation.

Les gaz ne peuvent pas, comme les liquides, avoir une surface libre sur laquelle aucune pression ne soit exercée; car nous avons dit qu'il faut un obstacle pour arrêter leur force expansive, qui est indéfinie. D'après cela, on pourrait conclure que l'atmosphère n'est pas bornée à douze ou quinze lieues, comme on le dit communément, puisqu'à cette limite les molécules de l'air toujours poussées par leur force élastique, et ne trouvant rien qui les arrêtât, se précipiteraient dans le vide et se dissiperaient de plus en plus, jusqu'à remplir enfin toute l'immense étendue des cieux. Ainsi l'air serait partout; il envelopperait la lune comme la terre, il envelopperait le soleil et les planètes; et il formerait autour de ces astres des atmosphères analogues à l'atmosphère terrestre. Nous démontrerons en optique que les phénomènes observés ne justifient point ces conclusions; et sans expliquer à présent les causes probables qui retiennent les molécules de l'air, nous adopterons l'opinion que notre atmosphère est limitée et qu'elle n'a en effet que douze ou quinze lieues d'étendue. Au delà est le vide; la dernière couche de l'atmosphère est la dernière limite de la masse pondérable de la terre.

73. *De la pression de l'air.* —Les conditions générales de l'équilibre étant une fois posées, nous pouvons constater, par des expériences directes, que toutes les couches inférieures de l'air sont en effet pressés par les couches supérieures, et qu'elles le sont diversement suivant la hauteur à laquelle on s'élève au dessus du niveau de la mer.

*Expérience du crève-vessie.* — On met sur la platine de la machine pneumatique une espèce de manchon de verre (*Fig.* 87), dont les parois sont très-épaisses, et qui est fermé à sa partie supérieure par une membrane de vessie, très-bien tendue et fortement arrêtée sur ses bords. Cette membrane éprouve, d'une part, la pression de l'air extérieur qui tend à l'abaisser, et de l'autre, la pression de l'air intérieur qui tend à la soulever, de telle sorte qu'elle reste en équilibre entre ces deux pressions opposées. Si par quelque moyen on soufflait dans le vase une nouvelle quantité d'air, la pression intérieure deviendrait la plus forte, et la membrane se renflerait en dehors; au contraire, si on enlève de l'air, la pression intérieure deviendra plus faible, et la membrane, cédant à la pression extérieure, devra fléchir et s'enfoncer en dedans. C'est là l'effet qu'on obtient en faisant jouer la machine pneumatique, car elle aspire peu à peu tout l'air qui est contenu dans le vase : dès les premiers coups de piston, on voit la membrane fléchir sous la pression extérieure, puis elle fléchit de plus en plus; enfin quand le vide est fait, on voit qu'elle est très-tendue, et par conséquent très-pressée. On peut juger qu'un poids de 100 kilogrammes, qui serait posé sur elle, lui donnerait moins de tension. Alors, si l'on donne avec le doigt un coup, même très-léger, au milieu de la membrane, elle éclate en mille pièces, et l'on entend une explosion plus forte qu'un coup de pistolet, tant est grande la pression de l'air extérieur, et l'effort qu'il fait pour rentrer dans le vase; car c'est en rentrant avec impétuosité qu'il produit tant de bruit.

Au lieu d'une pression de haut en bas, on aurait une

pression latérale, si le crève-vessie était incliné, ou une pression de bas en haut, s'il était renversé; toutes ces pressions ne produiraient pas moins d'effet que la première, ce qui prouve bien que l'air presse dans tous les sens, ou que les pressions se transmettent et deviennent aussi des pressions de bas en haut, comme il arrive dans les liquides.

Cette expérience semble d'abord très-étonnante; on ne comprend pas comment l'air d'un appartement peut exercer une pression si prodigieuse. Il faudrait qu'il fût bien pesant s'il n'agissait que par sa pesanteur, car une colonne d'eau qui aurait toute la hauteur de l'appartement serait bien loin de produire un tel effet. C'est qu'aussi il y a une autre cause. Supposons, pour un moment, que l'expérience ait été faite en plein air; alors, d'après les principes de l'hydrostatique, la pression serait égale au poids de la colonne d'air, ayant pour base la largeur de la membrane, et pour hauteur, non pas un mètre, ni dix mètres, ni cent mètres, mais toute la hauteur de l'atmosphère; dix lieues si l'atmosphère a dix lieues, cent lieues si l'atmosphère en a cent. Puisque sur une même couche de niveau les pressions sont toujours égales, on voit que dans un appartement la pression qui s'exerce sur le crève-vessie est aussi toute la pression atmosphérique.

En mesurant cette pression, qui fait éclater avec tant de bruit la membrane du crève-vessie, on aurait tout le poids d'une colonne d'air qui s'élève aussi haut que l'atmosphère peut s'étendre. De même qu'un physicien pourrait, au fond de la mer, avec un appareil semblable, trouver le poids total de la colonne d'eau qui s'éleverait au dessus de sa tête.

74. *Mesure de la pression atmosphérique.* — Puisque l'atmosphère enveloppe la terre, elle en presse tous les points, comme elle presse la membrane du crève-vessie; elle presse également toute la surface des continens et toute la surface des eaux, soit dans l'immense étendue des mers,

soit dans les lacs, soit dans les vases qui servent à nos expériences.

Supposons qu'un tube plonge par une de ses extrémités dans un vase rempli d'eau (*Fig.* 88) : le liquide se met au même niveau dans le tube et dans le vase, parce que la pression atmosphérique est la même, dans l'intérieur du tube en $nn'$, et au dehors sur la suface $NN'$. Mais si on aspire une partie de l'air contenu dans le tube, le liquide monte comme s'il était lui-même aspiré; il monte de plus en plus à mesure que l'aspiration continue, il s'arrête quand elle cesse, et la colonne soulevée reste suspendue dans l'intérieur du tube. Cette expérience, qui n'est qu'un jeu d'enfant, va nous donner le moyen de mesurer la pression atmosphérique, et de trouver le poids total de l'air, comme si nous pouvions mettre tout l'atmosphère dans une balance. En aspirant l'air, on diminue la pression qui s'exerce à l'intérieur du tube, sans rien changer à la pression extérieure : celle-ci étant alors la plus forte, elle force le liquide à monter, jusqu'à ce que la condition d'équilibre soit remplie, c'est-à-dire jusqu'à ce que la pression soit la même sur toute la couche de niveau, aussi bien à l'intérieur en $nn'$ qu'à l'extérieur en $NN'$. Au moment où ces pressions sont égales le liquide cesse de monter; mais la pression intérieure qui s'exerce sur $nn'$ se compose de deux parties : de la pression due au poids de la colonne soulevée, et de la pression due à l'élasticité de l'air qui reste au-dessus du sommet de cette colonne. Ainsi, en diminuant de plus en plus l'élasticité de l'air, l'eau intérieure doit s'élever de plus en plus, et enfin, si l'on épuise l'air complètement, il faudra qu'elle s'élève à tel point qu'à elle seule elle presse sur $nn'$ autant que l'atmosphère presse au dehors sur $NN'$; il faudra donc que le poids de cette colonne d'eau soit égal au poids d'une colonne d'air de même base, ayant pour hauteur toute la hauteur de l'atmosphère; car, sur chaque centimètre carré de surface, l'air et l'eau ne pressent que par leur

poids. Voilà donc le moyen de peser une colonne atmosphérique, quelle que soit la hauteur à laquelle elle puisse s'élever; tout se réduit à trouver un tube assez long, et à épuiser l'air assez complètement. Pascal en fit l'expérience à Rouen, en 1646; son tube avait 46 pieds de long, et pour s'éviter la peine d'en épuiser l'air peu à peu, ce qui aurait été impossible en ce temps-là, il le fit sceller à un bout, le remplit de vin, et ferma l'autre bout avec un bouchon. Alors, par le moyen de cordes et de poulies, le tube fut redressé verticalement, et l'extrémité inférieure fut plongée dans un vase d'eau; au moment où l'on enleva le bouchon qui la fermait, toute la colonne liquide s'abaissa dans le tube jusqu'à ce que son sommet fût à environ 32 pieds au dessus du niveau de l'eau du vase. Dans les 14 pieds qui étaient au dessus, il n'y avait point d'air, c'était le vide; ainsi, la colonne liquide faisait à elle seule équilibre à la pression atmosphérique; d'où il suit qu'une colonne d'eau ou de vin de 32 pieds de hauteur pèse autant qu'une colonne d'air de même base. Ainsi, chaque point de la surface de la terre est pressé comme s'il était recouvert d'une couche d'eau de 32 pieds de hauteur; et nous, qui vivons au fond de l'océan de l'air, nous sommes pressés de toutes parts comme si nous étions au fond d'un lac, avec 32 pieds d'eau au dessus de nos têtes.

C'est à des fontainiers de Florence que nous devons le premier germe de cette découverte. Ayant eu l'occasion de faire un corps de pompe qui avait plus de 32 pieds de hauteur, ils virent, avec grande surprise, que l'eau ne voulait pas monter jusqu'à son sommet. A cette époque, on expliquait l'ascension des liquides, en disant que la nature avait *horreur du vide*, et qu'elle y poussait les liquides pour le remplir. Les explications par *les causes occultes* n'étaient pas de celles dont Galilée pût se contenter; aussi, dès qu'il eut connaissance du fait observé par les fontainiers, il supposa que la pesanteur de l'air en était la véri-

table cause. Toricelli, son disciple, en donna la preuve la plus décisive; voici à peu près son raisonnement : pour exercer des pressions égales, les colonnes liquides doivent avoir des hauteurs qui soient en raison inverse de leur densité; donc, un liquide qui pèserait une fois plus que l'eau, ferait équilibre à l'atmosphère avec une colonne de 16 pieds, et le mercure, qui pèse à peu près quatorze fois plus que l'eau, doit faire équilibre avec une colonne qui est la quatorzième partie de 32 pieds, ou environ 28 pouces. C'est une conséquence facile à vérifier : on prend un tube de verre d'une trentaine de pouces, fermé par un bout; on le remplit de mercure, et ensuite, après l'avoir bouché avec le doigt, on le retourne verticalement pour en plonger l'extrémité dans une cuvette remplie de même liquide (*Fig.* 90). Aussitôt qu'on enlève le doigt, la colonne intérieure descend de quelques pouces, puis elle s'arrête; l'équilibre est établi, et le petit filet de mercure qui reste suspendu dans le tube est une balance qui donne le poids de l'atmosphère. Cet appareil est le *baromètre*; la colonne d'eau de Pascal était un véritable baromètre à eau. Le vide qui est au dessus de la colonne barométrique s'appelle le *vide barométrique* ou *le vide de Torricelli.*

Nous pouvons à présent mettre une grande exactitude dans nos résultats. La *hauteur* du baromètre est la hauteur verticale du sommet $ss'$ (*Fig.* 90), au dessus du niveau $NN'$; elle n'est pas la même dans tous les lieux, mais sur les bords de la mer elle est ordinairement de 76 centimètres. Ainsi, pour un centimètre de base, la colonne soulevée a un volume de 76 centimètres cubes; et son poids, qui est égal au volume multiplié par la densité, est par conséquent de $76 \times 13,59$, ou de $1^k,033$, car la densité du mercure est de 13,59. La colonne d'air atmosphérique qui repose sur la mer et qui a un centimètre de base, a donc dans toute sa hauteur un poids de $1^k,033$; on peut même pousser plus loin le calcul, et trouver le poids de la masse entière de

l'air qui compose l'atmosphère, car autant il y a de centimètres carrés dans la surface de la terre, autant il y a de fois $1^k,033$ dans le poids total de l'air. Le rayon du globe étant de 6366745 mètres, sa surface est d'environ 100 mille myriamètres; sur chaque myriamètre le poids est d'un million de millions de tonnes, de chacune mille kilogrammes; ainsi, le poids total de l'air est de cent mille millions de millions de tonnes. Voilà donc le poids total de l'air, des vapeurs, et des exhalaisons de toutes sortes qui composent l'atmosphère. Il sera curieux d'examiner, comme nous le ferons plus tard, si cette masse de substances gazeuses éprouve des variations accidentelles, ou des variations séculaires, et si elle a sensiblement changé depuis que Toricelli et Pascal l'ont pesée pour la première fois.

75. *Construction du baromètre.* — On donne à cet instrument des formes différentes suivant l'usage auquel on le destine; mais il y a quelques conditions générales d'exactitude qu'il faut toujours remplir, quelle que soit la forme que l'on adopte.

1° Il faut que le mercure soit très-pur, parce que sa densité s'altère avec sa pureté.

2° Quand la colonne monte ou descend dans l'intérieur du tube, la surface extérieure s'abaisse ou s'élève, et il faut disposer l'appareil pour qu'on puisse à chaque instant mesurer la hauteur du baromètre, c'est-à-dire la hautevr verticale du niveau intérieur au dessus du niveau extérieur.

3° Il faut que le vide soit parfait au dessus du sommet de la colonne barométrique; car s'il restait un peu d'air dans cet espace, ou s'il y avait quelques vapeurs, ce serait une force élastique qui agirait sans cesse pour repousser le mercure, et qui l'empêcherait de monter à son vrai niveau.

Pour obtenir le vide aussi exactement qu'il est possible, on fait bouillir le mercure de la manière suivante (*Fig.* 89): On remplit le tube au tiers de sa longueur, et on le fait

bouillir à plusieurs reprises dans toute cette étendue; ensuite on verse une nouvelle quantité de mercure qui soit un peu chaud, pour ne pas faire éclater le tube, et on recommence l'ébullition dans toute la longueur de cette nouvelle colonne; on ajoute ainsi de nouvelles quantités de mercure, que l'on fait successivement bouillir jusqu'à ce qu'enfin l'ébullition ait parcouru toute la longueur du tube ou à très-peu près; alors on achève de le remplir avec du mercure bouilli, et le baromètre est terminé. Cependant il est bon de vérifier si par le retournement on n'aurait pas laissé entrer quelques bulles d'air; il faut pour cela incliner le tube un peu vivement pour que le mercure vienne en frapper le sommet; s'il donne un coup sec, on peut espérer que le vide est assez bien fait, sinon l'opération est certainement manquée.

Quand toutes ces conditions sont remplies, il y a encore, en général, deux corrections à faire pour avoir la hauteur du baromètre : l'une est relative à *la capillarité*, et l'autre à *la température*, à laquelle se trouve le mercure au moment de l'observation. Le sommet de la colonne barométrique est arrondi par la capillarité, et en même temps il est retenu par elle à une hauteur d'autant moindre que le tube est plus étroit. Nous donnerons dans la météorologie les tables nécessaires pour faire les corrections qui dépendent de cette cause; mais nous pouvons dès à présent faire remarquer que dans certains baromètres le sommet de la colonne est loin d'être convexe, comme il devrait être : quelquefois il est plan, quelquefois même il est concave; Don Casbois avait observé ce fait, et on en avait donné diverses explications; mais M. Dulong a fait voir que ce phénomène singulier tient à un oxide de mercure qui se forme pendant l'ébullition, et qui se dissout dans le reste de la masse. Il faut donc avoir grand soin de ne pas faire bouillir le mercure au contact de l'air, car les corrections de la capillarité supposent essentiellement que la colonne prend

toute la convexité qu'elle doit prendre. Nous donnerons pareillement des tables de correction pour la température, et l'on conçoit combien elles sont importantes, puisque le mercure, en se dilatant, devient de plus en plus léger, et que par cette cause la colonne peut être trop haute de plusieurs millimètres.

On distingue deux sortes de baromètres : les *baromètres à siphon* et *les baromètres à cuvette*. Les premiers sont ceux dont le tube est recourbé à sa partie inférieure en forme de siphon (*Fig*. 91), tandis que dans les derniers le tube est tout droit, et plonge par son extrémité dans une cuvette plus ou moins large (*Fig*. 90).

76. *Le baromètre ordinaire* est un baromètre à siphon (*Fig*. 95), porté sur une monture en bois; *l'échelle des hauteurs* est ordinairement en métal; le *zéro* de sa division est fixe, et se trouve au niveau du mercure de la courte branche; ce niveau changeant quand le baromètre change, il en résulte des erreurs d'autant plus grandes que la courte branche est plus étroite.

77. *Le baromètre à robinet* (*Fig*. 90 *bis*) est un baromètre à siphon, qui porte à sa partie inférieure une garniture en fer et un robinet de même métal. Pour transporter cet instrument on l'incline d'abord, de manière que la branche fermée se remplisse complétement de mercure; alors on ferme le robinet, et on a moins à craindre que l'air puisse pénétrer dans le tube par les secousses du voyage.

78. *Le baromètre à cadran* est un baromètre à siphon, dont le mécanisme est représenté (*Fig*. 97). Une poulie mobile, faisant partie de la monture, porte, au moyen d'un fil de soie, deux petits poids qui ne sont pas tout-à-fait égaux : le plus lourd tombe sur la surface du mercure et partage tous ses mouvemens ; il monte quand elle monte, et descend quand elle descend : le plus léger fait l'office de contre-poids, en sorte que la poulie est toujours entraînée, tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre ; en

même temps l'aiguille qu'elle porte parcourt les divisions du cadran, et marque, selon le préjugé, le beau, le variable ou la tempête. On s'arrange pour que les variations les plus extrêmes du baromètre ne puissent pas faire parcourir à l'aiguille plus d'une révolution du cadran; car elle passerait alors sur une même division pour deux hauteurs différentes, et le baromètre dirait deux fois la même chose dans deux circonstances très-différentes, ce qui ne serait pas le moyen de dire toujours la vérité. Habituellement on met la tempête au dessus du cadran, et le beau fixe dans le bas, le variable prend sa place au milieu; on préfère ce baromètre quand on recherche l'agrément, mais on ne s'en sert jamais quand on veut de l'exactitude.

79. Parmi les baromètre à siphon, il y en a un qui réunit tout les avantages, soit pour l'exactitude de ses indications, soit pour la facilité avec laquelle ou peut le transporter dans les voyages les plus difficiles : c'est le baromètre de M. Gay-Lussac. Comme il est sans robinet, 'sans piston, sans bouchon même, on peut faire une observation en moins d'une minute. « Pour mieux faire concevoir ce qui caractérise ce baromètre, dit M. Gay-Lussac, je le supposerai dépouillé de sa monture, qu'on peut varier d'ailleurs d'une infinité de manières. La *figure* 91 représente le tube barométrique dans sa situation propre à l'observation. N*n* sont les deux niveaux du mercure; la grande branche AB est d'un égal diamètre jusqu'en F. En ce point le tube AF est soudé avec un autre tube FBC, fort, en verre, dont le diamètre intérieur doit être de 1 à 2 millimètres. La petite branche CD du baromètre doit avoir le même diamètre que la partie NF de la grande. Elle est fermée en D; mais en E, à la distance de 2 à 3 centimètres de D, se trouve un petit trou capillaire par lequel le mercure ne peut point s'échapper à moins d'une pression très-grande, et qui néanmoins permet à l'air d'entrer dans la cuvette et d'en sortir librement.

» La *figure* 92 représente le baromètre renversé ; le mercure occupe la partie CBFA du tube, et l'excédant est logé en D. Il convient que cet excédant soit nul ou au moins très-petit. On fait sortir très-aisément le mercure en tenant la branche CD horizontalement, le trou E en dessous ; le mercure étant au dessus du trou, on dilate l'air en chauffant la branche CD, et le mercure est alors expulsé. Si au contraire on veut faire rentrer du mercure dans le baromètre, on le plonge dans la situation où le représente la *figure* 91, dans un bain de mercure jusqu'au dessus du trou E, et on incline le tube. L'air étant alors dilaté dans la branche CD, le mercure y rentrera, pourvu que la perte de l'élasticité de l'air soit plus grande que la longueur de la colonne dont le mercure s'abaisserait dans un tube dont le diamètre serait égal à celui du trou. J'ai supposé ici que le baromètre n'avait d'autre ouverture que le trou capillaire E; mais il est bien plus facile de régler le baromètre pendant qu'il est ouvert en D.

» La figure 93 représente le baromètre dans la même position que la *figure* 92, avec cette différence seulement que la branche BFA est supposée vide de mercure depuis B jusqu'en G; ce qui peut arriver en imprimant au baromètre des secousses violentes. Dans ce cas, l'instrument ne pourrait plus servir si le tube CBGF avait un diamètre aussi grand que le tube AF, parce qu'en renversant l'instrument, l'air contenu en BG monterait nécessairement dans sa partie supérieure; mais si le tube CBGF n'a au plus que 2 millimètres, comme je l'ai indiqué, la colonne GF du mercure ne pourra pas être divisée par l'air, et celui-ci sera expulsé par la chute du mercure lorsqu'on retournera le baromètre. Il arrivera même quelquefois que la colonne GA restera suspendue, quoique plus grande que la pression barométrique; mais en donnant une légère secousse à l'instrument, de haut en bas, la colonne tombera aussitôt, et l'air contenu en BG sera chassé.

» Il y a donc deux choses qui caractérisent le nouveau baromètre; 1°. le petit trou capillaire E, qui laisse une libre circulation à l'air, et empêche cependant le mercure de sortir; 2°. le tube CBF d'un diamètre assez étroit pour que l'air ne puisse pas diviser la colonne de mercure, comme cela a lieu dans l'ingénieux baromètre conique d'Amontons.

» En construisant ce baromètre il faut que l'artiste ait l'attention de ne point porter d'huile dans la branche BCD, soit en la fermant en D, soit en faisant le petit trou E. J'ai déjà dit que c'est l'huile ou tout autre corps gras qui est la cause de la poudre noire ou de la crasse qui se forme dans les baromètres, quand le mercure est d'ailleurs bien pur, et on ne saurait l'exclure avec trop de soin. J'ai fait faire plus de cinq cents lieues à mon baromètre; M. Descotils, dans un voyage en Italie, lui en a fait faire plus de douze cents, et je puis affirmer que le mercure était aussi net que le premier jour, malgré les secousses continuelles auxquelles il a été exposé dans une chaise de poste.....

» On voit aisément pourquoi l'axe du tube AF n'est pas dans le prolongement de celui du tube FB; c'est afin que le centre de gravité de l'instrument soit sur cet axe lorsque l'instrument sera suspendu librement en A (*Fig.* 94)......

» Le transport de ce baromètre est très-facile, et il ne pourra se déranger si l'on a l'attention de le tenir renversé, comme l'indiquent la figure 92, ou au moins incliné sous un angle de quinze à trente degrés. J'ai annoncé qu'il ne fallait pas plus d'une minute pour l'observer; et, en effet, il suffit de le renverser pour qu'il se prête immédiatement à l'observation.

» On peut le monter de beaucoup de manières; par exemple, le mettre dans une canne fendue dans toute sa longueur, et qui s'ouvre à charnière (*Fig.* 94); mais je préfère l'enfermer dans un tube creux de métal, fendu dans une partie de sa longueur, et recouvert par un autre tube

qui peut glisser longitudinalement ou tourner à léger frottement sur le premier. Si l'on adopte cette dernière construction, le tube extérieur doit aussi être fendu pour laisser voir la colonne de mercure ou la cacher, suivant que les fentes des deux tubes seront ou ne seront pas appliquées l'une sur l'autre.

» On peut encore, si l'on veut avoir un instrument peu dispendieux, tracer les divisions sur le verre même, et enfermer le tube barométrique dans un tube de fer-blanc qui s'ouvre à ses deux extrémités. Il n'est pas alors nécessaire de se servir d'un vernier, parce que les divisions étant près du mercure, on évite facilement l'effet de la parallaxe, et on peut, avec un peu d'habitude, évaluer avec l'œil $\frac{1}{8}$ et même $\frac{1}{10}$ de millimètre, pour vu que l'on observe l'origine de la courbe du mercure. Enfin, si l'on voulait se conserver la facilité de nettoyer le tube CD, dans la crainte que le mercure ne se ternît à la longue, on pourrait se contenter de le fermer en D avec une peau ou avec un liége.

» La manière de se servir du nouveau baromètre ne présente aucune difficulté; on observe la hauteur de la colonne inférieure et celle de la colonne supérieure, et on les retranche l'une de l'autre. Si les deux branches sont d'un égal diamètre, il suffira d'observer la hauteur de la colonne supérieure, et de doubler les variations apparentes pour avoir les variations réelles. Lors même que les deux branches n'auraient pas un égal diamètre, on pourrait encore se contenter d'une seule observation, pourvu que l'on connût les vraies différences de niveau de centimère en centimètre, parce que dans l'intervalle on pourrait regarder, sans erreur sensible, les deux branches comme ayant le même diamètre. Cet avantage, commun à tous les baromètres à siphon, est très-précieux pour les voyages géodésiques; car on fait d'autant plus d'observations qu'elles sont plus faciles à faire. »

Un jeune artiste, M. Bunten, a fait au baromètre de

M. Gay-Lussac un léger changement qui paraît offrir quelques avantages; il suffit, pour en prendre une idée, de jeter les yeux sur la *figure* 91 *bis*. On voit que l'air qui tendrait à monter dans le vide barométrique serait arrêté en B.

80. *Baromètre de Fortin*. — Le baromètre de Fortin (*Fig.* 96) est un baromètre à cuvette; ce qui le distingue, c'est qu'il est à niveau fixe. Ce niveau est marqué par l'extrémité d'une pointe d'ivoire. La cuvette a un fond mobile; il suffit de tourner la vis V dans un sens ou dans l'autre pour faire monter le niveau ou pour le faire descendre; en même temps qu'on la tourne on observe l'image de la pointe d'ivoire qui se réfléchit sur la surface brillante du mercure, et il est facile d'amener le niveau exactement en contact avec l'extrémité de la pointe. C'est par là qu'on commence toutes les observations. Le tube de métal qui enveloppe le tube de verre est fendu des deux côtés vers sa partie supérieure, et il porte des divisions qui sont comptées de l'extrémité même de la pointe, de telle sorte qu'il suffit de diriger par les deux fentes un rayon visuel, qui rase la surface de la colonne, et de voir à quelle division il correspond. Pour éviter les erreurs que l'on pourrait commettre en s'écartant au dessus ou au dessous de la ligne horizontale, il y a un curseur qui glisse sur le tube de métal, et qui n'est fendu que dans une petite partie de sa longueur; la fente qui est en avant et celle qui est derrière, se terminent par deux plans de même niveau, perpendiculaires à la longueur du tube. On abaisse le curseur jusqu'à ce que le rayon visuel qui rase ces plans rase pareillement le sommet de la colonne; alors il suffit de voir à quelle division du tube correspondent les plans, ce qui est très-facile, parce qu'ils forment le *zéro* du nonius du curseur. De cette manière on peut avoir la hauteur du baromètre à moins de $\frac{1}{20}$ de millimètre.

81. *Variations du Baromètre*. — Nous ne savons rien de ce qui se passe dans les hautes régions de l'air; ici, à la

surface de la terre, nous observons des changemens de température, tantôt périodiques, tantôt brusques et inattendus; nous observons des vents et des orages, mais nous ne pouvons juger des secousses atmosphériques que jusqu'à la hauteur où l'agitation des nuages nous en permet l'observation. Au moyen du baromètre nous serons instruits de ce qui se passe dans toute la hauteur de l'atmosphère; car il nous donne à chaque instant le poids de la colonne d'air, et c'est exactement comme si nous avions toute cette colonne en équilibre dans une balance.

On présume bien d'après cela que dans un même lieu le baromètre ne reste pas stationnaire dans le cours d'une année, et qu'il éprouve des variations plus ou moins considérables. Et en effet, à Paris, par exemple, il n'y a presque pas de jours où il ne change de plusieurs millimètres. En général on distingue deux espèces de variations dans le baromètre, les variations *accidentelles* et les variations *horaires*; celles-ci se reproduisent très-régulièrement à des heures marquées, et sont d'une grandeur constante; les autres surviennent irrégulièrement sans qu'on en puisse prévoir ni l'époque ni l'étendue.

82. *Hauteurs moyennes.* — Comme les variations ne sont jamais très-promptes, si on observait le baromètre d'heure en heure, vingt-quatre fois dans la journée, qu'on ajoutât les vingt-quatre hauteurs observées, et qu'on en prît la vingt-quatrième partie, on aurait très-exactement la *hauteure moyenne du jour;* car on aurait le même résultat que si l'on eût observé de demi-heure en demi-heure, ou même de minute en minute. Mais on conçoit que s'il fallait essentiellement passer par les vingt-quatre observations pour avoir la hauteur moyenne d'un jour, il faudrait, quelle qu'en soit l'importance, désespérer d'y arriver jamais. Quel observateur pourrait s'assujettir pendant des années entières à une régularité aussi minutieuse et aussi mécanique?

C'est sans doute pour cette raison que l'on a été si longtemps avant de savoir trouver des moyennes qui pussent servir à quelque chose : tantôt on ajoutait la hauteur *maximum* et la hauteur *minimum*, et on en prenait la moitié, tantôt on employait de la même manière les hauteurs du lever du soleil et celles de deux heures, tantôt on faisait d'autres combinaisons qui n'étaient ni moins arbitraires ni moins inexactes. Enfin M. de La Place a donné la théorie complète de l'équilibre barométrique ; et plusieurs grands observateurs, à la tête desquels on doit placer M. Ramond et M. de Humboldt, nous ont appris tout ce qu'on pouvait tirer du baromètre, soit pour la météorologie, soit pour les grands nivellemens géographiques. M. Ramond, dans l'excellent ouvrage qu'il a publié sur ce sujet, a fait voir, par une longue suite d'expériences, qu'il existe une heure de la journée où la hauteur du baromètre est très-sensiblement la hauteur moyenne du jour. Cette heure est, dans nos climats, l'heure de midi : ainsi on est dispensé de faire vingt-quatre observations dans la journée ; que l'on en fasse une seule avec exactitude à l'heure de midi, et l'on aura la hauteur que l'on cherche. On conçoit qu'en ajoutant les trente hauteurs moyennes des trente jours du mois, et prenant le trentième de la somme, on aura la *hauteur moyenne du mois* ; et qu'en traitant de même les douze moyennes des douze mois, on aura enfin la *hauteur moyenne de l'année*. Ce résultat est fondamental et très-important à connaître pour chaque lieu de la terre ; mais M. Ramond a encore démontré que dans nos climats le phénomène curieux des variations horaires ne peut ni se démêler, ni se mesurer exactement, à moins qu'on ne détermine encore les moyennes mensuelles et annuelles qui correspondent à certaines heures de la journée. C'est pour cela que les observateurs qui veulent concourir d'une manière utile au progrès de la science observent régulièrement le baromètre quatre fois par jour,

et aux heures précises de 9 heures du matin, de midi, de 3 heures du soir et de 9 heures du soir.

A Paris, la hauteur moyenne n'est pas la même pour toutes les années, mais les variations qu'elle éprouve ne sont pas considérables; en dix années, de 1816 à 1825, la plus grande différence n'est pas de quatre millimètres; voici le tableau des résultats.

| ANNÉES. | HAUTEUR moyenne. | MINIMUM. | MAXIMUM. | DIFFÉRENCE. |
|---|---|---|---|---|
| | millimètres. | millimètres. | millimètres. | millimètres. |
| 1816 | 754,161 | 730,57 | 772,76 | 42,19 |
| 1817 | 756,400 | 730,61 | 772,92 | 42,31 |
| 1818 | 756,053 | 733,78 | 771,49 | 37,71 |
| 1819 | 755,103 | 738,56 | 772,45 | 33,89 |
| 1820 | 756,002 | 733,19 | 769,67 | 36,48 |
| 1821 | 756,065 | 719,03 | 780,89 | 61,86 |
| 1822 | 757,472 | 737,18 | 771,46 | 34,28 |
| 1823 | 754,969 | 723,05 | 772,30 | 49,25 |
| 1824 | 755,750 | 728,87 | 773,45 | 44,58 |
| 1825 | 757,679 | 728,63 | 776,46 | 47,83 |
| Moyenne des 10 années. | 755,966 | 730,35 | 773,38 | 43,04 |

Ainsi, à Paris, la hauteur moyenne de dix années est à très-peu près 756 millimètres.

La moyenne des hauteurs minimum est de 730mm35; la moyenne des hauteurs maximum de 773,38; enfin la moyenne oscillation de l'année est de 43,04, c'est-à-dire qu'à Paris c'est dans une longueur de 43,04 que s'accomplissent en général toutes les variations barométriques de l'année,

83. *Variations accidentelles.* — En chaque lieu le baromètre est en oscillation continuelle au dessus et au dessous de la moyenne de l'année, et quelquefois il éprouve des

secousses qui le font tomber de beaucoup au dessous; à Paris, il descend assez fréquemment jusqu'à 740. On voit par le tableau précédent qu'il est descendu à 730, à 728, à 725, et qu'en décembre 1821 il est tombé à 719,05; c'est la plus grande dépression qui ait été observée à Paris depuis 1785; car c'est de cette époque seulement que l'on fait à l'Observatoire une série régulière d'observations météorologiques avec des instrumens qui méritent confiance. On voit que le baromètre éprouve aussi des ascensions assez considérables; il atteint assez fréquemment à 770; et en février 1821, il s'est élevé jusqu'à près de 781. Il est remarquable que les deux variations extrêmes qui ont eu lieu dans le cours de dix années soient à des époques si rapprochées l'une de l'autre, et que l'année où elles se trouvent ne donne en dernier résultat qu'une moyenne tout-à-fait ordinaire. De 719,05 à 780,89, la différence est $61^{mm},86$, ou à peu près 28 lignes; ainsi, dans dix ans, le baromètre à Paris a éprouvé des oscillations extrêmes d'autant de lignes qu'il y a de pouces dans sa hauteur ordinaire.

Les variations du baromètre indiquent un changement présent dans l'atmosphère; beaucoup de personnes pensent qu'elles annoncent aussi un changement futur, et qu'il suffit de savoir bien consulter le baromètre pour prédire à coup sûr la pluie ou le beau temps plusieurs jours à l'avance; c'est une question de météorologie que nous examinerons plus tard. Mais il n'est peut-être pas inutile de donner ici le tableau des pressions différentes que supporte une surface de 1 mètre carré, suivant les hauteurs du baromètre.

| HAUTEUR du baromètre en millimèt. | PRESSION sur un mètre carré en kilogr. | HAUTEUR du baromètre en millimèt. | PRESSION sur un mètre carré en kilogr. | HAUTEUR du baromètre en millimèt. | PRESSION sur un mètre carré en kilogr. |
|---|---|---|---|---|---|
| 500mm | 6793k | 600mm | 8152k | 700mm | 9510k |
| 510 | 6929 | 610 | 8287 | 710 | 9646 |
| 520 | 7065 | 620 | 8423 | 720 | 9782 |
| 530 | 7201 | 630 | 8559 | 730 | 9918 |
| 540 | 7336 | 640 | 8695 | 740 | 10054 |
| 550 | 7472 | 650 | 8831 | 750 | 10189 |
| 560 | 7608 | 660 | 8967 | 760 | 10325 |
| 570 | 7744 | 670 | 9103 | 770 | 10461 |
| 580 | 7880 | 680 | 9238 | 780 | 10597 |
| 590 | 8016 | 690 | 9374 | 790 | 10733 |

On voit que, le baromètre étant à 780, une surface de 1 mètre carré supporte 10597 kilogr., et que cette énorme charge se réduit à 9782 kilogr. quand le baromètre tombe à 720; ainsi, la surface entière de notre corps étant à peu près de 1 mètre carré, nous sommes dans ces circonstances soulagés d'un poids de 815 kilogr. Une cause aussi puissante exerce nécessairement une influence sur les fonctions physiologiques, et surtout sur les phénomènes de la respiration et de la circulation, mais ses effets sont en général si compliqués qu'il faudra sans doute de longues expériences pour parvenir à les démêler.

La hauteur de 600 millimètres est à peu près celle qui a lieu au dessus du Mont-d'Or et à la poste du Mont-Cénis; un voyageur qui part du niveau de la mer pour s'élever sur ces montagnes est soulagé d'un poids de 2173 kilogrammes, et il est soulagé de 3539 kilogrammes lorsqu'il arrive en un lieu où le baromètre marque seulement 500 millimètres; c'est à peu près sa hauteur ordinaire sur l'Etna et sur le Mont Liban. On sait tout ce que les voyageurs racontent des sensations extraordinaires que l'on éprouve au

sommet des hautes montagnes où le baromètre ne marque plus que 400 ou 500 millimètres. On voit de toutes parts un immense horizon, on est soulagé d'un pesant fardeau, on ne respire qu'un air pur et léger, et il semble en effet que l'on ne touche plus à terre.

Les variations accidentelles du baromètre n'ont pas la même étendue dans tous les climats, ni à toutes les hauteurs ; les limites entre lesquelles elles se produisent sont en général d'autant plus écartées l'une de l'autre, que la latitude est plus grande. Dès 1690 le père De Bèze avait reconnu qu'à Pondichéry et à Batavia le baromètre reste immobile, quelles que soient les tempêtes que l'on éprouve ; Legentil avait fait plus tard la même observation aux mêmes lieux, et maintenant il est bien démontré que dans toute la zône équatoriale, le baromètre est en effet insensible à toutes les grandes secousses atmosphériques, mais qu'il éprouve cependant des variations périodiques et régulières, que l'on appelle variations horaires.

84. C'est vers l'année 1722 que les *variations horaires* du baromètre furent constatées d'une manière certaine par les observations d'un Hollandais, dont le nom reste inconnu. Depuis cette époque, plusieurs observateurs ont essayé d'en déterminer l'étendue et les périodes pour différens lieux de la terre. M. de Humboldt a démontré, par de longues séries d'observations très-précieuses, que sous l'équateur le *maximum* de hauteur correspond à 9 heures du matin ; passé 9 heures le baromètre descend jusqu'à 4 heures, ou même $4^{h.} \frac{1}{2}$ de l'après-midi, où il atteint son *minimum* ; ensuite il remonte jusqu'à 11 heures du soir, où il arrive à un second *maximum*, et il redescend enfin jusqu'à 4 heures du matin. Ainsi, chaque jour il passe par les deux *minimum* de 4 heures du matin et de 4 heures du soir, et par les deux *maximum* de 9 heures du matin et de 11 heures du soir. Les mouvemens de dépression et d'ascension sont si réguliers, qu'ils pourraient servir à marquer les heures,

comme les mouvemens de l'horloge. Seulement, ils ont peu d'amplitude; car ils s'accomplissent dans une longueur que M. de Humboldt évalue à deux millimètres depuis le point le plus haut du matin jusqu'au point le plus bas de l'après-midi.

Dans nos climats, ces variations horaires sont tellement dissimulées par les variations accidentelles, qu'il fallait, pour les découvrir et pour les mesurer, toute la sagacité et toute la précision d'un observateur tel que M. Ramond. Ce n'est que par les moyennes de plusieurs mois d'observations prises avec exactitude et aux heures convenables, que l'on peut trouver les périodes horaires. M. Ramond a reconnu que leurs époques varient avec les saisons. En hiver, le *maximum* est à 9 heures du matin, le *minimum* à 3 heures de l'après-midi, et le second *maximum* à 9 heures du soir.

En été, le *maximum* a lieu avant 8 heures du matin, le *minimum* à 4 heures de l'après-midi, et le second *maximum* à 11 heures du soir.

Au printemps et en automne, les heures *critiques* sont intermédiaires, se rapprochant plus ou moins de celles de l'été ou de celles de l'hiver. L'étendue absolue des variations est un peu moindre qu'à l'équateur. Dans les latitudes les plus élevées, il faut comparer et discuter un plus grand nombre d'observations pour en faire sortir les périodes horaires; et, sur ce point, la science a beaucoup à désirer; cependant en traitant de la météorologie, nous discuterons tous les résultats importans des observations barométriques, et nous verrons aussi les nombreuses applications du baromètre.

85. *Loi de Mariotte.* — La loi de Mariotte est la loi de la compressibilité des fluides élastiques; elle exprime le *rapport* qui existe entre les volumes et les pressions. Ce rapport est très-simple : les *volumes des gaz sont en raison inverse des pressions qu'ils supportent.* Pour démontrer par l'expérience cette vérité fondamentale, on prend un tube

recourbé (*Fig.* 98), dont la courte branche est cylindrique, et fermée à son extrémité, et dont la longue branche reste ouverte pour recevoir la pression atmosphérique. On y verse du mercure, d'abord en petite quantité; et en inclinant le tube pour faire sortir une partie de l'air de la courte branche, on arrive facilement à mettre le mercure au même niveau dans les deux branches. Alors, l'air enfermé dans l'espace *ab* se trouve exactement sous la pression atmosphérique; et si, à partir de ce point, on le force à se resserrer dans la moitié, le tiers, ou le quart de la longueur *ab*, on aura réduit son volume à la moitié, au tiers, ou au quart de ce qu'il est, à cause que le tube est cylindrique. Pour cela, on verse du mercure par la branche ouverte, et on en verse jusqu'à ce que le sommet de la petite colonne soit parvenu au point *m*, milieu de la longueur *ab*; ce point *m*, et le point *n* qui lui correspond dans la grande branche, supportent l'un et l'autre la même pression, puisqu'ils sont au même niveau; cette pression est de deux atmosphères, car elle se compose du poids de la colonne *ns*, que l'on trouve toujours égale en hauteur à la colonne barométrique, et de la pression atmosphérique elle-même qui s'exerce encore au sommet de la colonne. Donc, il a fallu une pression double pour réduire à moitié le volume de l'air contenu dans la courte branche. En donnant à l'appareil une branche ouverte beaucoup plus longue, on démontre de la même manière qu'il faut une pression de trois atmosphères pour réduire le volume au tiers, et de quatre atmosphères pour le réduire au quart de ce qu'il était sous une seule pression atmosphérique. Cette loi, découverte par Mariotte en France, et à peu près à la même époque par Boyle en Angleterre, a été depuis confirmée de plusieurs manières, soit pour des pressions moindres que la pression atmosphérique, soit pour des pressions de plusieurs atmosphères. On a démontré aussi qu'entre ces limites elle s'applique à tous les gaz.

Cependant, au delà de ces limites, la loi de Mariotte

restait incertaine; on ne pouvait l'appliquer avec confiance ni pour les recherches théoriques ni pour les applications. MM. Arago et Dulong, chargés par l'Académie des Sciences, en 1828, de déterminer les tensions de la vapeur d'eau dans les températures élevées, ont commencé par chercher la loi de compressibilité de l'air, et ils ont poussé leurs expériences jusqu'à la pression de 27 atmosphères. Nous devons essayer de donner ici une idée de ce travail, qui est l'un des plus importans et des plus remarquables qui aient été entrepris dans ces derniers temps.

Les appareils avaient été établis au collége Henri IV dans une vieille tour carrée, au centre de laquelle on avait pu facilement élever un mât en bois d'une centaine de pieds de hauteur. Au pied du mât était un fort vase en fonte avec un manomètre et une pompe foulante, et contre sa hauteur un tube vertical en verre de 75 à 80 pieds de longueur (il était composé de 13 tubes de 6 pieds mis bout à bout).

On prendra une idée de cette disposition en jetant les yeux sur la *figure* 228, *planche* 10.

VV' est le vase en fonte,

P la pompe foulante,

MM' le manomètre, fermé à son extrémité supérieure;

TT' le tube vertical, ouvert en haut, et

AA' le mât contre lequel il s'élève.

Si l'on suppose 1° que le vase en fonte contienne du mercure, 2° que le tube du manomètre soit gradué et contienne de l'air sec, 3° que le mercure s'élève à la même hauteur dans le tube du manomètre et dans le tube vertical TT', il est évident que l'air sera enfermé sous la pression atmosphérique et que l'on connaîtra le volume qu'il occupe sous cette pression. Maintenant, si à partir de ce point, l'on fait agir la pompe foulante pour introduire de l'air ou de l'eau au dessus de la surface supérieure du mercure dans le vase en fonte, on exercera ainsi des pressions toujours croissantes sur l'air sec du manomètre, et en même temps

le mercure s'élevera de plus en plus dans le tube vertical. Enfin, pour avoir à chaque instant le volume de l'air comprimé, il suffira d'observer exactement la longueur qu'il occupe encore dans le tube du manomètre à partir de l'extrémité fermée; et pour avoir la pression correspondante, il suffira de mesurer la différence des niveaux du mercure dans le tube du manomètre et dans le tube vertical.

Or, le tube vertical ayant 78 pieds, ou plus de 30 fois 28 pouces, on pourrait pousser l'expérience jusqu'à une trentaine d'atmosphères, s'il ne fallait pas déduire de cette colonne la hauteur du mercure dans le manomètre : c'est pour cette raison que les expériences ont été limitées à 27 atmosphères.

On conçoit facilement que des expériences de cette nature exigeaient toute l'habileté dont MM. Arago et Dulong ont donné tant de preuves par leurs belles découvertes dans toutes les branches de la physique. Il nous serait impossible de décrire ici, dans tous ses détails, la perfection avec laquelle les diverses pièces de l'appareil étaient ordonnées et toutes les précautions ingénieuses qui avaient été prises pour assurer l'exactitude des résultats. Nous indiquerons seulement quelques-unes des dispositions les plus essentielles de la pompe foulante, du tube vertical, et du manomètre.

*Pompe foulante.*—Il ne fallait pas seulement que la pompe foulante fût assez bien faite pour injecter l'eau sous une pression de 27 atmosphères, il fallait encore qu'elle pût maintenir l'eau injectée d'une manière assez rigoureuse pour que les sommets des colonnes de mercure fussent parfaitement fixes dans le manomètre et dans le tube vertical. Cette condition était remplie au moyen de la soupape B, qui se trouve au bas de la course du piston. De plus, ce que nous disons ici de la soupape de la pompe s'applique à toutes les *jointures* de l'appareil : elles devaient être assez exactement faites pour qu'il n'y eût aucune *fuite*.

*Tube vertical.*—Il était composé de 13 tubes de cristal fa-

briqués exprès dans la verrerie de Choisy par MM. Thibeaudeau et Bontemps. Chacun de ces tubes avait 2 mètres de longueur, 5 millimètres de diamètre intérieur et 5 millimètres d'épaisseur; ils étaient réunis par de fortes viroles, comme on le voit en C, *figure* 228, et plus en détail dans la *figure* 225. La plaque horizontale H sert de repère; il y en a une pareille au bas de chaque tube, et l'on mesure la distance de deux repères consécutifs en posant la règle divisée sur le repère inférieur et en poussant une petite languette L, *figure* 225, jusqu'à ce qu'elle se trouve à l'affleurement du repère supérieur. Pour que les tubes inférieurs ne fussent pas surchargés et comme écrasés par le poids des tubes supérieurs, on avait eu l'heureuse idée d'attacher à l'extrémité supérieure de chaque tube des cordons qui redescendaient verticalement après avoir passé sur des poulies et qui étaient tirés en bas par des poids égaux au poids du tube (*Fig.* 228). Ainsi la colonne n'exerçait aucune pression sur sa base.

*Manomètre.* — Le tube manométrique était semblable à ceux de la colonne verticale, seulement il avait été effilé à son extrémité supérieure, gradué avec soin, sans rien tracer au diamant sur sa surface, de peur d'affaiblir sa résistance, et ensuite ajusté sur la platine E du vase en fonte. Alors on y avait fait passer pendant long-temps un courant d'air sec, et enfin on avait scellé à la lampe son sommet effilé, sans faire éprouver une altération sensible à sa graduation. On voit dans la *figure* 226 comment l'extrémité inférieure du tube manométrique est ajustée sur la platine E du vase en fonte; on doit remarquer que la virole se recourbe sous l'épaisseur du tube, afin que la pression ne tende pas à le soulever. Pour que l'air du manomètre fût bien maintenu à la même température, on l'avait enveloppé d'un manchon de verre HH' dans lequel passait continuellement un courant d'eau. Enfin, pour voir avec une grande exactitude la position du sommet de la colonne de mercure on avait disposé en dedans du

manchon un voyant V avec une loupe; cette pièce devait monter et descendre, et on lui donnait ces mouvemens au moyen d'un tourniquet Q sur lequel était enroulé un fil de soie qui allait passer sur les poulies supérieures L', sur la poulie inférieure L, et qui venait s'attacher à la garniture du voyant.

Des thermomètres (*Fig.* 227) convenablement disposés donnaient à chaque instant la température des diverses parties de l'appareil; et des baromètres, l'un supérieur et l'autre inférieur, donnaient aussi la pression atmosphérique au sommet de la colonne verticale.

On peut donc admettre la loi de Mariotte comme rigoureusement démontrée pour l'air par l'expérience directe jusqu'à 27 atmosphères, et l'on ne peut guère douter, d'après cela, qu'elle ne s'étende au moins jusqu'à 50 atmosphères sans altération sensible.

La densité d'un corps étant en raison inverse du volume qu'il occupe, on peut encore exprimer la loi de Mariotte, en disant que *les densités des gaz sont proportionnelles aux pressions qu'ils supportent.* Sous une seule pression atmosphérique, la densité de l'air étant à peu près la 770e partie de la densité de l'eau, il en résulte que, sous une pression de 770 atmosphères, l'air est aussi dense que l'eau. Ainsi, au fond de la mer, à une profondeur de 770 fois 32 pieds, ou de 24640 pieds, qui font à peu près deux lieues, l'air serait plus pesant que l'eau, et, quoiqu'à l'état gazeux, il ne pourrait pas s'élever pour venir à la surface. Mais rien ne prouve jusqu'à présent qu'il y ait de l'air au fond de la mer, comme rien ne prouve qu'il y ait un liquide au dessus de l'atmosphère.

Deux volumes successifs, occupés par un gaz, et les deux pressions correspondantes, forment quatre quantités qui sont en proportion; de telle sorte que, trois étant données, on peut trouver la quatrième. Il en serait de même des deux densités successives, avec les deux volumes ou avec les deux pressions correspondantes.

86. *De la machine pneumatique.* — La machine pneumatique est destinée à faire le vide; elle se compose de deux corps de pompe cylindriques pareils à celui qui est représenté en RR′ (*Fig.* 102.)

PP′ est un piston qui monte et qui descend au moyen de la tige T; mais dans toutes ces positions il *tient le vide*, c'est-à-dire que rien ne peut passer entre son contour et les parois du corps de pompe.

*s* est la soupape du piston; elle est très-légère, et s'ouvre de bas en haut; elle se lève quand la pression inférieure est un peu plus grande que la pression supérieure, et, dans le cas contraire, elle reste hermétiquement fermée.

La longue tige *crt* est la soupape du corps de pompe; c'est le piston qui l'ouvre et qui la ferme: quand il monte, il la soulève; le renflement *r* vient s'appuyer contre la plaque supérieure du corps de pompe, et le piston glisse à frottement dur sur toute la longueur de la tige *cr*; quand il descend, il l'entraîne avec lui; le tronc de cône *c* tombe dans l'ouverture conique qui est au dessous; sa base ne fait qu'un seul plan avec le fond du corps de pompe, et le piston vient s'appliquer exactement sur ce plan.

Au fond de l'ouverture conique, le *conduit* de la machine prend naissance, il s'étend ensuite jusqu'en *v*; à cette extrémité il porte un pas de vis propre à recevoir des ballons, des récipiens ou d'autres vases dans lesquels on veut faire le vide.

LL′ est la *platine* de la machine pneumatique; elle se compose d'une forte plaque de métal sur laquelle on mastique un plateau de verre de plusieurs lignes d'épaisseur, dont la surface supérieure est *dressée* avec soin et légèrement *doucie*.

C est une *cloche* où l'on veut faire le vide; son bord inférieur est pareillement dressé et douci, afin qu'il puisse s'appliquer exactement sur la platine. Une légère couche de suif achève d'établir l'adhérence; car il ne faut pas, même

quand le vide est fait, que l'air extérieur puisse pénétrer entre la cloche et la platine.

Supposons que le piston soit au milieu de sa course, que les soupapes soient ouvertes, et que l'air soit sous la pression atmosphérique, dans la cloche, dans le conduit et dans le corps de pompe; si l'on abaisse le piston, la seconde soupape se ferme, et l'air ne peut plus repasser du corps de pompe dans la cloche; il s'échappe par la première soupape, et il n'en reste plus quand le fond du piston est venu s'appliquer sur le fond du corps de pompe. Alors le piston étant soulevé, le vide se ferait si les soupapes restaient fermées; mais la seconde soupape s'ouvre, l'air de la cloche arrive pour remplir le vide, et la première soupape reste fermée à mesure que le piston s'élève, parce que la pression intérieure est toujours moindre que la pression extérieure. Si la capacité du corps de pompe est, par exemple, la dixième partie de la capacité de la cloche et du conduit, il arrivera dans le corps de pompe $\frac{1}{11}$ de l'air qu'il faut enlever pour avoir le vide. On rabaisse le piston; la seconde soupape se ferme, et l'air se comprime de plus en plus: bientôt son élasticité l'emporte sur celle de l'air extérieur; il soulève la première soupape et s'échappe dans l'atmosphère. Un autre coup de piston fait sortir encore $\frac{1}{11}$ de l'air restant; puis, en continuant ce jeu alternatif, on fait sortir à chaque coup $\frac{1}{11}$ du reste, puis $\frac{1}{11}$ du reste, et ainsi de suite. D'où l'on voit que jamais le vide ne se pourra faire, puisqu'en prenant la onzième partie d'une quantité et la onzième partie des restes successifs, on ne peut jamais parvenir à prendre cette quantité tout entière. Mais on parvient cependant à réduire l'air de la cloche à une élasticité de plus en plus faible; les meilleures machines les réduisent à 1 ou 2 millimètres de tension. La rapidité de l'opération dépend du rapport qui existe entre la capacité du corps de pompe et celui de la cloche. Ce rapport étant donné, on peut calculer facilement combien il faut de coups de

piston pour réduire l'air à une tension donnée ; et ensuite on peut, par la loi de Mariotte, calculer le poids de l'air qui reste, quand on connaît le poids du volume primitif.

Quand le vide est fait, la pression atmosphérique qui s'exerce sur le piston n'étant plus balancée par aucune pression intérieure, il faut, pour le soulever, faire un effort de $1^k,033$ pour chaque centimètre carré de sa surface, plus encore tout l'effort nécessaire pour vaincre le frottement. Un piston de 1 décimètre de rayon serait aussi difficile à soulever qu'un poids d'environ 300 fois $1^k,033$; ce qui fait plus de 600 livres. Mais dans les machines à deux corps de pompe et à deux pistons, ces pressions se détruisent, et il ne reste à vaincre que les frottemens.

La machine pneumatique est représentée dans son ensemble (*Fig.* 105 et 106). Les tiges des deux pistons sont à *crémaillères ;* elles engrènent dans le même pignon : quand l'une monte, l'autre descend, et leur mouvement alternatif est produit par le mouvement alternatif d'une manivelle.

La *clef* de la machine est un robinet qui porte une ouverture ordinaire et une ouverture *latérale* (*Fig.* 104); celle-ci est conique, et se ferme au moyen d'un bouchon de métal B. Quand la machine doit tenir le vide, on tourne l'ouverture latérale du côté des corps de pompe; et pour *rendre l'air*, on la tourne du côté de la cloche, et ensuite on tire le bouchon de métal.

Le baromètre qui marque à chaque instant la tension de l'air de la cloche, s'appelle une *éprouvette.* Quelquefois c'est un baromètre ordinaire BB', *figure* 106, et, le plus souvent, c'est un baromètre tronqué. Dans ce dernier cas, l'éprouvette est enfermée dans une cloche longue et étroite VV' (*Fig.* 102) qui communique au conduit de la machine. Cette communication s'ouvre ou se ferme au moyen d'un robinet. Le baromètre tronqué est vu de profil (*Fig.* 102), et il est représenté de face (*Fig.* 99 et 107); s'il a seulement 7 pouces de longueur depuis le niveau extérieur *n* jusqu'à son

sommet *s*, il ne commence à descendre que quand la pression de l'air est réduite au quart de la pression atmosphérique; enfin, il descend de plus en plus dans la branche fermée, et monte dans la branche ouverte, de telle sorte que la pression de l'air de la cloche est toujours mesurée par la différence des deux niveaux. Au moment où l'on rend l'air, la pression subite qui s'exerce sur le mercure le refoule avec violence dans la branche fermée, et il est bon d'y ménager un *étranglement*, de peur qu'il n'en brise le sommet.

La machine pneumatique fut inventée vers 1650, par Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg; elle fut, peu de temps après, changée et perfectionnée par un grand nombre de physiciens. Hook plaça le corps de pompe verticalement, Papin ajouta la platine, Hawksbée fit deux corps de pompe au lieu d'un, et ensuite les soupapes furent modifiées d'une infinité de manières.

86. Otto de Guericke fit avec sa machine l'expérience curieuse des *Hémisphères de Magdebourg*; elle consiste à faire le vide dans un globe de métal dont les deux moitiés sont simplement juxtà-posées. Avant que le vide soit fait, les deux *hémisphères* se séparent facilement; mais quand il n'y a plus d'air intérieur pour balancer la pression extérieure, l'adhérence est si forte que toute la force d'un homme est insuffisante pour les séparer. En effet, si la section des hémisphères a seulement 1 décimètre de rayon, ou environ 300 centimètres carrés de surface; la pression extérieure qui les unit équivaut à plus de 300 kilogrammes. On met une bande de cuir à la jonction des hémisphères pour favoriser le contact, et il y a un robinet qui s'ouvre pour faire le vide et qui se ferme pour empêcher la rentrée de l'air.

Boyle fut un des premiers et des plus habiles à se servir de la machine pneumatique. Le vide était alors une chose nouvelle; quelques philosophes avaient imaginé autrefois que le vide était possible, mais, avant Toricelli, personne n'avait pu le produire. Dans la chambre barométrique

toutes les expériences étaient difficiles, et les académiciens de Florence, malgré tous leurs efforts ingénieux, n'avaient pu obtenir qu'un petit nombre de résultats. Enfin la machine de Otto de Guericke donnait le moyen de faire le vide à volonté dans de très-grands espaces; et, ce qui était plus précieux encore, elle donnait le moyen d'exposer directement dans ces espaces, sans air et sans pression, des animaux, des plantes et des corps de toute espèce. On conçoit aisément combien ces expériences devaient exciter la curiosité des physiciens.

Dans le vide les corps enflammés s'éteignent; ainsi l'air contient des élémens qui sont nécessaires à la combustion, et à la production de la flamme.

La fumée tombe comme une masse pesante; ainsi les nuages tomberaient s'il n'y avait pas de l'air pour les soutenir.

Il y a des insectes qui vivent dans le vide pendant plusieurs jours; ainsi ils peuvent passer plusieurs jours sans respirer sensiblement. Les oiseaux périssent en quelques secondes, même avant que le vide soit complètement fait. Il faut cependant que l'air de la machine soit plus raréfié que l'air qu'ils respirent dans les hautes régions de l'atmosphère où ils s'élèvent.

La plupart des fruits et des substances fermentescibles se conservent très-bien dans le vide. Le procédé de M. Appert, pour conserver les substances alimentaires, est une ingénieuse et très-utile application de cette vérité.

Une boule mince de verre, remplie d'air, se brise.

On fait jaillir un liquide à une grande hauteur (*Fig.* 113).

L'eau froide entre en ébullition; ainsi, au sommet des hautes montagnes, où l'air est très-raréfié, l'eau doit bouillir plus tôt que dans la plaine, et c'est ce que l'on observe en effet à l'hospice du Saint-Bernard et ailleurs.

87. *Machine de compression.* — La machine de compression est destinée à comprimer l'air. Elle se compose de deux corps de pompe, semblables à ceux de la ma-

chine pneumatique; la seule différence est dans les soupapes, qui s'ouvrent en sens contraire, c'est-à-dire de *haut en bas*. Quand on abaisse le piston, il comprime l'air, et le fait passer dans le récipient; quand on le relève, l'air extérieur ouvre la première soupape et entre dans le corps de pompe, tandis que l'air comprimé du récipient presse la seconde soupape, et la tient fermée. Enfin, quand on rabaisse le piston, la première soupape se ferme, l'air se comprime de plus en plus, il devient capable d'ouvrir la seconde soupape et passe encore dans le récipient, et ainsi de suite.

L'éprouvette de la machine de compression est un tube droit, fermé à son sommet, rempli d'air, et plongeant par son extrémité inférieure dans une cuvette de mercure. Au commencement de l'expérience l'air du tube est sous une pression atmosphérique, et le mercure est au même niveau à l'intérieur et à l'extérieur; à mesure que la pression augmente le mercure monte dans le tube, le volume de l'air se réduit successivement à la moitié, au tiers ou au quart de ce qu'il était, et d'après la loi de Mariotte, on juge qu'il est sous une pression de deux, trois ou quatre atmosphères. Dans le récipient la pression de l'air est plus grande que dans le tube, de toute la hauteur de la colonne de mercure qui s'élève au dessus du niveau extérieur.

88. Il y a des *pompes de compression* qui sont destinées à être vissées sur divers appareils pour y comprimer de l'air; alors elles se composent simplement d'un corps de pompe et d'un piston sans soupape. Le corps de pompe présente trois modifications particulières (*Fig.* 108); 1° il porte un pas de vis à son extrémité inférieure; 2° il est muni d'une soupape *s* dont le piston s'approche de très-près quand il arrive au bas de sa course; 3° vers sa partie supérieure, et sur sa paroi latérale, il est percé d'un petit trou *t* qui reste toujours ouvert et qui fait cependant l'office de

soupape, parce qu'il est tantôt au dessus, tantôt au dessous du piston.

Quelquefois, au lieu d'un petit trou latéral, le corps de pompe porte une véritable soupape latérale (*Fig.* 109); cette disposition offre l'avantage de pouvoir comprimer des gaz quelconques; car il suffit pour cela de faire communiquer le tube de la soupape au réservoir qui les contient.

89. *Mesure des pressions des gaz contenus dans divers appareils.* — On mesure en général les pressions des gaz par deux moyens : par le moyen des colonnes liquides ou par le moyen des soupapes. Les appareils à colonne liquide s'appellent des *manomètres*, les soupapes s'appellent, en général, *soupapes de pression*, et *soupapes de sûreté* quand elles sont destinées à empêcher les explosions.

90. *Soupapes de pression.* — Ces soupapes sont indéfiniment variables dans leurs formes et dans leurs dimensions; tantôt elles ont la forme d'un cône tronqué (*Fig.* 110 et 112); tantôt elles sont un simple plan qui s'adapte très-exactement sur les parois de l'ouverture (*Fig.* 111). Dans tous les cas elles doivent fermer hermétiquement jusqu'à l'instant où elles sont soulevées. Pour estimer l'élasticité du gaz qui est capable de les soulever, il faut connaître deux choses, 1° le poids total de la soupape; 2° l'étendue de la surface qui est exposée à la pression verticale du gaz. Supposons que le poids soit évalué en kilogrammes, et que l'étendue de la surface pressée soit évaluée en centimètres carrés : si le poids est, par exemple, de 100 kilogrammes, et la surface de 25 centimètres, chaque centimètre carré supportera 4 kilogrammes; donc, d'après ce que nous avons vu (74), le nombre des atmosphères est égal à $\frac{4}{1{,}033}$ ou à $3^{at},87$, plus encore la pression atmosphérique ordinaire qui s'exerce aussi sur la soupape. Ce même moyen s'applique aux liquides comme aux gaz; c'est celui que l'on emploie pour essayer les tuyaux de conduite et les cylindres des machines à vapeur.

91. *Manomètres.* — Le nom de manomètre avait été donné, par Varignon, à un appareil qu'il destinait à mesurer la raréfaction de l'air. Maintenant on appelle *manomètre* tout appareil à colonne liquide propre à mesurer des pressions. Le baromètre mesure la pression libre de l'atmosphère; le *manomètre* mesure la pression des fluides contenus dans les espaces fermés. L'éprouvette de la machine pneumatique et celle de la machine de compression sont de véritables manomètres. Cependant on peut établir quelques distinctions dans les appareils de cette espèce.

La *Figure* 103 représente un manomètre, au moyen duquel on mesure la tension des gaz contenus dans le ballon B; il a été employé par De Saussure et ensuite par Berthollet, dans les recherches importantes qu'ils ont faites l'un et l'autre sur la végétation et sur les phénomènes des corps vivans. Les animaux et les plantes étaient renfermés dans le ballon B.

Les *tubes de sûreté* sont des manomètres qui indiquent la tension des gaz contenus dans les appareils auxquels ils sont adaptés. Quand la tension est égale à la pression atmosphérique, le liquide est au même niveau dans les deux branches (*Fig.* 100); et, en général, la différence des niveaux mesure la différence des pressions; il suffit de connaître la densité du liquide contenu dans le tube pour évaluer cette différence de pression en millimètres de mercure.

Les tubes de sûreté ont été inventés par Welter : ils sont d'un grand usage en chimie, parce qu'ils empêchent les *explosions* et l'*absorption*. Quand la pression intérieure devient trop faible, l'air atmosphérique refoule le liquide dans la boule et pénètre dans l'appareil : au contraire, quand elle est trop forte, elle chasse la colonne liquide et trouve une issue par le tube.

Les grands gazomètres qui servent à *lancer* le gaz de l'éclairage, sous une pression constante, sont munis de manomètres qui communiquent aussi à l'air extérieur : il en

est de même dans les souffleries des forges et dans une foule d'autres appareils industriels.

Quand les pressions doivent être très-fortes, on emploie un manomètre analogue à celui de la machine de compression, on enferme de l'air au dessus de la colonne liquide (*Fig.* 101), et la réduction de volume qu'il éprouve donne, par la loi de Mariotte, les divers états de pression par lesquels il passe. Seulement il faut tenir compte des variations de chaleur qui peuvent donner à l'air plus ou moins de ressort, comme nous le verrons plus tard.

92. *Fusil à vent.* — Il suffit de nommer cet appareil pour que l'on en devine le mécanisme. La crosse contient un réservoir à soupape dans lequel on comprime de l'air sous huit ou dix atmosphères. On y ajoute un canon qui reçoit le projectile et qui en dirige le mouvement. On fait partir une détente qui presse la soupape; l'air sort avec violence, chasse la balle, et la soupape se referme à l'instant. On peut tirer de suite plus ou moins de coups, suivant que le réservoir est plus ou moins grand. Le fusil à vent peut lancer la balle avec autant de vitesse que le fusil à poudre : cet effet ne se produit pas sans bruit ni sans lumière. L'air comprimé, se débandant subitement, fait une explosion pareille à celle du crève-vessie; et à l'extrémité du canon on voit un jet de flamme qui est produit par le frottement des petites poussières solides que l'air rencontre ou qu'il emporte avec lui; car il paraît que dans un air très-pur il n'y a plus de flamme perceptible.

93. *Appareils à gaz portatif.* —Dans ces appareils nouveaux, le gaz de l'éclairage est comprimé sous trente atmosphères. Les réservoirs, avant d'être employés, sont soumis à une forte épreuve : ils ne sont admis au service que quand ils ont pu résister à soixante atmosphères. Il y a deux sortes d'explosions à craindre : celle qui résulterait d'un mélange du gaz avec l'air atmosphérique, et celle qui résulterait de la rupture des parois. Celle-ci offre un phé-

nomène de *recul* très-curieux. Dès que le gaz s'est ouvert une issue, sa force motrice exerce une réaction, et lance le réservoir comme le fusil à vent lance la balle. On conçoit qu'il doit être fort difficile de retenir un gaz sous une pression aussi énorme que trente atmosphères. On y parvient cependant; et, ce qui est peut-être encore plus difficile, on parvient, par un mécanisme ingénieux, à en régler la dépense et à n'en laisser sortir que la proportion juste qui est nécessaire à l'éclairage.

---

## CHAPITRE VII.

*De l'équilibre des corps flottans et des corps plongés dans les fluides.*

94. On voit des corps pesans, qui se meuvent en sens contraire de la pesanteur : le liége, le bois, et beaucoup d'autres corps remontent quand ils sont plongés dans l'eau; le fer remonte de la même manière, quand il est plongé dans le mercure; la fumée s'élève dans l'air, les nuages restent suspendus dans l'atmosphère, à peu près comme les vaisseaux restent flottans à la suface des eaux. Les fluides paraissent avoir une puissance particulière pour rejeter les corps qu'ils enveloppent de toutes parts, et pour soutenir ceux qui reposent sur leurs surfaces. Tous ces phénomènes, et même ceux de l'aérostatique et de l'ascension des ballons, dépendent d'un seul principe, que l'on appelle *le principe d'Archimède.* C'est en effet Archimède qui en est l'inventeur, et c'est à l'occasion de cette découverte que l'on rapporte de lui ce trait d'enthousiasme : il fut, dit-on, saisi d'une si grande joie qu'il sortit du bain, et qu'il parcourut les rues de Syracuse en s'écriant : *Je l'ai trouvé, je l'ai trouvé.*

95. *Principe d'Archimède.* — Ce principe général peut être énoncé de la manière suivante : *un corps plongé dans un fluide y perd une partie de son poids égale au poids du fluide qu'il déplace;* que le fluide soit un liquide ou un gaz, la proposition est également vraie.

Pour prendre une première idée du principe d'Archimède, concevons un grand vase rempli d'eau, et, dans l'intérieur de l'eau, un cube dont les faces supérieures et infé-

rieures soient horizontales (*Fig.* 116). Il est évident, d'après les principes d'hydrostatique : 1° que les pressions latérales sont égales et contraires, et qu'elles se détruisent l'une l'autre; 2° que la face supérieure supporte de *haut en bas* une pression égale au poids de la colonne liquide qui repose sur elle; 3° que la face inférieure supporte de *bas en haut* une pression égale au poids de la colonne liquide qui reposerait sur elle, si le cube était lui-même de l'eau. Cette pression l'emporte sur la première, de tout le poids de la colonne liquide que déplace le cube, donc le cube est repoussé en haut avec une force égale à cet excès de pression; donc enfin il perd une partie de son poids égale au poids du volume liquide qu'il déplace. La pression de bas en bas en haut est ce que l'on appelle *la poussée du fluide*. Ainsi, un corps plongé est soumis à deux forces contraires : à son poids, qui tend à le faire descendre, et à la poussée du fluide, qui tend à le faire remonter. Si ces deux forces sont égales, le corps reste en équilibre; il a perdu tout son poids. Si la poussée du fluide est la plus grande, le corps est repoussé jusqu'à la surface; enfin, si elle est la plus faible, le corps tombe au fond du vase. On pourrait facilement, par quelques considérations mécaniques, généraliser cette proposition, et l'étendre aux corps de forme quelconque; mais on peut aussi la démontrer directement par les expériences de la *balance hydrostatique*. Cet appareil est une balance ordinaire, au moyen de laquelle on peut peser les corps, d'abord en les laissant dans l'air, et ensuite en les plongeant dans un fluide. C (*Fig.* 115) est un cylindre creux en cuivre, dont le cylindre massif P peut remplir exactement la capacité. On les met ensemble dans l'un des bassins de la balance, et dans l'autre bassin l'on met des poids pour établir l'équilibre. Cela fait, on met la balance au repos; on attache le cylindre P par un fil très-fin, on le suspend au dessous du bassin pour le faire plonger dans l'eau, comme il est représenté dans la *figure* 115, et

l'on trouve qu'il a perdu de son poids, car dans cette seconde pesée la balance est loin d'être en équilibre. Alors, si on verse de l'eau dans le cylindre C, de manière à le remplir exactement, l'équilibre est rétabli; donc, en plongeant dans l'eau, le cylindre P perd une partie de son poids égale au poids du liquide qu'il déplace.

Voici une autre démonstration du principe d'Archimède, qui est tout-à-fait indépendante de la forme du corps plongé.

Dans l'intérieur de la masse fluide concevons un volume quelconque, une sphère, par exemple, qui ait un mètre de rayon. Imaginons que les molécules d'eau, qui sont actuellement comprises dans ce volume, soient congelées pour un moment, c'est-à-dire qu'elles forment une sphère solide au lieu d'une sphère liquide; mais que dans l'acte de la congélation elles ne soient ni éloignées, ni rapprochées l'une de l'autre, et qu'elles conservent exactement leurs positions et leurs distances. Il est évident que la sphère solide restera suspendue et en repos, comme faisait la sphère liquide; car l'adhérence que nous venons d'établir entre les diverses molécules ne peut ni les soutenir ni les faire tomber; elle ne change rien aux pressions ni à la pesanteur. Cette sphère solide et pesante a donc perdu son poids, puisqu'elle ne tombe pas, et elle l'a perdu parce qu'elle est environnée d'un fluide qui la presse de toutes parts. Donc, de l'ensemble des pressions inégales qui s'exercent en tous les points de sa surface, résulte une force unique, agissant de bas en haut, et précisément égale au poids de la sphère entière; ce raisonnement s'applique à un corps de forme quelconque.

Or, quelle que soit la forme du corps qui se congèle, comme nous le supposons; une fois qu'il est congelé, on pourrait le tourner d'une manière quelconque autour de son centre de gravité, et dans toutes les positions il resterait en équilibre. Donc la force de bas en haut, ou *la poussée du fluide*, est une force qui a son point d'application au centre

de gravité du fluide congelé; ce point s'appelle *le centre de pression*.

Si, au lieu de la substance fluide elle-même que nous supposons congelée, nous imaginons dans l'intérieur du fluide un corps étranger de substance quelconque, de liége, de marbre ou de fer, il est évident qu'il supportera de la part du fluide environnant les mêmes pressions qu'une masse congelée qui aurait la même forme que lui. Donc la poussée du fluide et le centre de pression ne dépendent que de la quantité et de la forme du liquide déplacé, sans dépendre en aucune manière de la nature de la substance qui déplace le liquide.

Ainsi, un corps plongé dans un fluide est toujours soumis à deux forces, dont nous connaissons maintenant les grandeurs, les directions et les points d'application : la première de ces forces est le poids du corps, qui agit de haut en bas, et qui est appliqué au centre de gravité de sa masse; la seconde est la poussée du fluide, qui agit de bas en haut, et qui est appliquée au centre de gravité du fluide déplacé : de là résultent des conditions d'équilibre et des conditions de stabilité ou d'instabilité, que nous allons déterminer.

96. *Conditions d'équilibre des corps plongés.* — Pour qu'un corps soit en équilibre au milieu d'un fluide, il faut en général que deux conditions soient remplies, 1° que le poids du corps soit égal au poids du fluide déplacé; 2° que le centre de gravité du corps et celui du fluide déplacé se trouvent sur une même verticale. Ces conditions se déduisent de ce qui précède; mais nous pouvons les rendre encore plus sensibles par un exemple. LSPS′ (*Fig.* 117) est une sphère, composée de deux parties; l'une, SLS′, qui est de liége, et l'autre, SPS′, qui est de plomb. Son centre de gravité est en $g$, et son poids est précisément égal au poids de l'eau qu'elle peut déplacer. Si on l'ajuste dans l'eau de manière que la section SS′ soit verticale (*Fig.* 118), elle sera

soumise à deux forces parallèles, égales et contraires, qui formeront un couple, savoir, à son poids $gV$ et à la poussée du fluide $cF$; et l'équilibre n'aura lieu que quand le couple sera déployé comme dans la *figure* 117, ou reployé sur lui-même comme dans la *figure* 119; dans le premier cas l'équilibre est stable, et il est instable dans le second.

Quand le corps est homogène, son centre de gravité coïncide avec le centre de pression, et la première condition d'équilibre est alors la seule nécessaire. On peut même l'exprimer autrement en disant que le corps et le fluide qui l'entoure doivent avoir la même densité. Une boule de cire reste suspendue au milieu de l'eau; elle tombe dans l'alcool, et elle nage sur le mercure, parce que sa densité est à peu près égale à celle de l'eau, plus grande que celle de l'alcool, et beaucoup moindre que celle du mercure.

Les poissons paraissent être en équilibre dans l'eau où ils vivent, car ils peuvent s'y tenir en repos sans être entraînés par leur poids ni rejetés par la poussée du fluide. Ainsi un poisson pèse précisément autant que l'eau qu'il déplace, il pèse un kilogramme s'il déplace un litre, et mille kilogrammes s'il déplace mille litres ou un mètre cube. Une baleine de 20 mètres de long déplace à peu près 500 mètres cubes, et pèse en conséquence 500 mille kilogrammes; et même un peu plus, à cause que l'eau de mer est un peu plus pesante que l'eau douce.

S'il est nécessaire que les poissons soient en équilibre pour n'être pas condamnés à se soutenir par un mouvement continuel au dessus des profondeurs de la mer, il est nécessaire aussi que leur équilibre ne soit ni instable, ni indifférent; et cette condition est remplie par un organe particulier qui sert aussi à d'autres usages; car dans l'organisation des êtres il n'y a pas une pièce qui n'ait qu'une seule fin. Cet organe est la vessie natatoire. Il a diverses formes dans les différentes espèces, mais il est toujours

placé pour alléger les parties supérieures et pour laisser plus de poids aux parties inférieures. De cette manière le centre de gravité du corps est plus bas que le centre de pression, et la condition de stabilité se trouve remplie. D'après les observations curieuses de M. Biot, le gaz de la vessie natatoire n'est pas de l'air atmosphérique; il est de l'azote presque pur dans les individus qui vivent près de la surface; et il se compose de près de 0,9 d'oxigène et de 0,1 d'azote, dans ceux qui vivent à des profondeurs de 1000 à 1200 mètres. A 8 ou 9000 mètres de profondeur, ces gaz seraient aussi denses que l'eau, et les vessies natatoires deviendraient inutiles pour l'équilibre.

Il paraît que les poissons se servent aussi de leur vessie natatoire pour exécuter des mouvemens de haut en bas ou de bas en haut, qu'ils n'exécuteraient que difficilement au moyen de leurs nageoires. Il suffit pour cela qu'ils puissent la resserrer ou la gonfler à volonté : dans le premier cas, leur poids restant le même et leur volume devenant moindre, ils sont plus denses que l'eau, et ils tombent; au contraire, dans le second cas, ils montent comme du liége.

Cependant ce phénomène n'est pas aussi simple qu'on l'imagine au premier instant. Un poisson au milieu de l'eau ne peut pas se gonfler comme un mammifère qui retient son haleine; il ne trouve pas de l'air à prendre ou à rejeter; c'est avec la même quantité de gaz qu'il doit opérer ces mouvemens. Il faut donc que, par une action volontaire, le gaz soit sans cesse plus comprimé qu'il ne le serait par le fluide environnant, et qu'un peu plus ou un peu moins d'énergie dans cette action comprimante lui donne successivement un moindre ou un plus grand volume. Cet effet est rendu sensible par l'appareil de la *figure* 114, qui s'appelle un *ludion*. Le ludion L monte ou descend, suivant que l'on soulève ou que l'on presse la membrane MM′ qui ferme le vase.

Dans les poissons que l'on pêche à une profondeur de

mille mètres, le gaz de la vessie natatoire est sous une pression d'eau équivalente à cent atmosphères; arrivé à la surface, il tend à prendre un volume cent fois plus grand; aussi observe-t-on que tout l'effort musculaire ne suffit plus pour le retenir; il s'échappe en refoulant tous les organes voisins, et surtout la membrane de l'estomac, qui est alors tellement tendue et dilatée, qu'elle vient former au dehors de la gueule une espèce de ballon fort singulier. On peut juger par là que les régions de la mer ont leurs peuples différens, non-seulement suivant les climats, mais encore suivant les profondeurs.

97. *Conditions d'équilibre des corps flottans.* — Il y a deux conditions d'équilibre pour les corps flottans comme pour les corps plongés, et ces conditions sont les mêmes; seulement la condition de stabilité est différente. Un vaisseau, par exemple, qui pèse un million de kilogrammes, n'est en équilibre que quand il déplace mille mètres cubes d'eau, qui pèsent comme lui un million de kilogrammes, et quand son centre de gravité et le centre de pression de l'eau se trouvent dans la même verticale. Mais il n'est point nécessaire que le centre de gravité se trouve au dessous du centre de pression; il suffit seulement qu'il se trouve au dessous d'un autre point que l'on appelle le *métacentre*, et dont la détermination nous entraînerait un peu trop loin. La position du métacentre dépend de la forme du vaisseau; celle du centre de gravité dépend de la distribution de la charge, et c'est de leur distance relative que dépend la rapidité des oscillations. C'est pour cette raison, et pour beaucoup d'autres encore, que, dans le chargement des vaisseaux, il y a un art particulier à distribuer convenablement les poids.

98. *Des aérostats.* — Le principe d'Archimède est vrai pour les gaz comme pour les liquides. Les corps plongés dans les gaz y perdent une partie de leur poids égale au poids du volume de gaz qu'ils déplacent. Si l'air atmosphé-

rique était très-pesant, s'il pesait, par exemple, deux ou trois fois autant que l'eau, la plupart des corps terrestres seraient soulevés par la poussée de ce fluide; et, nous-mêmes, nous serions emportés dans l'air comme le liége est emporté dans l'eau; nous ne pourrions être en équilibre que quand nous serions arrivés à une hauteur beaucoup plus grande que la hauteur des nuages. Mais l'air est si léger, il fait perdre aux corps si peu de leur poids, qu'il fallait une grande hardiesse de génie pour concevoir la possibilité de s'élever dans l'atmosphère, de s'y soutenir en équilibre, et d'y voguer librement comme on vogue sur la mer.

C'est aux frères Montgolfier que nous devons cette merveilleuse découverte. Ils avaient annoncé qu'une grande machine de leur invention serait capable de parcourir l'atmosphère : l'expérience en fut tentée à Annonay le 5 juin 1783, en présence des états-généraux et d'un concours immense de peuple; c'est alors que l'on vit en effet un spectacle nouveau sur la terre, et bien digne d'exciter l'enthousiasme : un globe immense qui s'élevait majestueusement dans les airs et qui semblait s'y soutenir par quelque puissance invisible. Cette espèce de prodige est cependant bien facile à comprendre. La *montgolfière*, car c'est ainsi que l'on appelle les appareils de cette nature, la montgolfière se compose d'un globe en papier vernis ou en taffetas, qui porte à sa partie inférieure une ouverture de quelques pieds carrés. Au dessous de cette ouverture, et à quelque distance, est suspendu un panier léger, en fil de métal, contenant un corps combustible, soit de la paille hachée, soit de la laine ou du papier. Ce combustible étant enflammé, l'air chaud qu'il produit monte de lui-même, pénètre dans le globe, et en remplit bientôt toute la capacité. A volume égal, l'air chaud pèse moins que l'air froid; ainsi le poids du globe est moindre que le poids de l'air qu'il déplace, et il doit s'élever, par l'excès d'énergie de la poussée du fluide : il s'élève, emportant avec lui le combus-

tible enflammé qui produit sa puissance ascensionnelle, et, pour qu'il s'arrête, il faut qu'il arrive dans des couches d'air assez raréfiées pour que la différence des poids, de l'air froid déplacé et de l'air chaud intérieur, soit justement égale au poids de l'enveloppe, du panier et du combustible qu'il contient.

Un physicien célèbre, dont nous déplorons la perte récente, Charles, eut l'heureuse idée de remplacer l'air chaud par le gaz inflammable, que l'on appelle aujourd'hui *l'hydrogène*, dont Cavendish avait fait connaître l'extrême légèreté dès l'année 1766. L'hydrogène est plus de quatorze fois plus léger que l'air, car sa densité est 0,0688, en prenant celle de l'air pour unité. Un centimètre cube d'air pèse $0^{g},001299075$, et $1000^{m.c.}$ pèsent $1299^{k},075$, tandis que $1000^{m.c.}$ d'hydrogène ne pèsent que $89^{k},760$. La différence est 1209,699. Ainsi un globe de 1000 mètres cubes, rempli d'hydrogène, peut enlever un poids de $1209^{k},699$. Un globe de 500 mètres cubes ne pourrait enlever que $604^{k},849$. C'est un *ballon* de cette grandeur que Charles fit construire; et, pour montrer la confiance que devait inspirer sa découverte, il entreprit, avec Robert, ce fameux voyage dans lequel il fut porté en quelques minutes à la hauteur de quatre ou cinq cents toises, et parcourut, dans cette région de l'atmosphère, plus de neuf lieues dans l'espace de deux heures. C'est du milieu des Tuileries que Charles fit son ascension; toute la population de Paris était en mouvement; les places publiques, les sommets des édifices, et tous les lieux élevés étaient couverts de spectateurs : un coup de canon fut le signal du départ, et bientôt on vit monter le ballon, comme un météore qui s'élève sur l'horizon; au plus haut des airs, on distinguait encore les banderolles flottantes, éclairées par le soleil, et les navigateurs tranquilles qui saluaient la terre. Jamais une expérience de physique n'excita tant d'admiration et un tel concert d'applaudissemens.

Charles ne pouvait manquer d'avoir des imitateurs, et il en eut en effet dans tous les pays savans. Mais entre tous les voyages aérostatiques qui furent entrepris pour des recherches scientifiques, on distingue ceux qui furent exécutés en France, en 1804, par MM. Gay-Lussac et Biot. Dans une première ascension, ces deux physiciens, parvenus à la hauteur de 4000 mètres, firent des expériences importantes sur l'intensité magnétique de la terre, sur l'électricité de l'air et sur la température de ces hautes régions. Dans une seconde ascension, M. Gay-Lussac, seul, s'éleva à la hauteur de 7000 mètres, la plus grande à laquelle l'homme soit jamais parvenu. MM. de Humboldt et Bonpland se sont élevés à 6100 mètres sur le Chimboraço au dessus du volcan de Cotopaxi. A cette grande hauteur on éprouve un froid très-vif, le thermomètre de M. Gay-Lussac descendit à 10° au dessous de glace, tandis qu'à la surface de la terre il marquait 30°. La sécheresse de l'air est si grande et les corps hygrométriques perdent si rapidement leur humidité, qu'on les voit se distordre et se tourmenter dans tous les sens. Le ciel paraît d'un bleu très-foncé et mêlé d'une teinte noire. Suspendu au milieu de ces espaces, dans un air si raréfié, à une si grande distance de la terre et de tous les corps résistans, aucun bruit ne vient frapper l'oreille, aucun objet ne se présente à la vue, et l'on éprouve alors un sentiment de solitude que M. Gay-Lussac seul peut décrire. Après une navigation de six heures, dans laquelle il avait parcouru plus de trente lieues en ligne horizontale, M. Gay-Lussac descendit lentement et aborda à la terre dans les environs de Rouen. Nous citerons en leur lieu les résultats dont il a enrichi la science par ce mémorable voyage.

---

## CHAPITRE VIII.

### *Principes de l'hydrodynamique et de l'hydraulique.*

99. L'HYDRODYNAMIQUE a pour objet de déterminer les principes du mouvement des fluides ; l'hydraulique est l'application de ces principes à l'art de conduire les eaux et de les faire servir à mouvoir les machines.

100. La question du mouvement des fluides est l'une des plus importantes de la mécanique rationnelle ; mais aussi elle est une des plus compliquées et des plus difficiles. Une masse fluide étant en repos, il ne faut, pour la mettre en agitation dans toute son étendue, qu'un léger dérangement dans une seule de ses molécules ; et les mouvemens qui en résultent sont modifiés par tant de causes, soit dans leurs vitesses, soit dans leurs directions, qu'il est à peine possible de concevoir la variété et la complication des phénomènes auxquels ils peuvent donner naissance. Cependant nous possédons sur ce sujet quelques lois fondamentales, déterminées par la théorie, et une foule d'expériences, qui, sans être soumises au calcul, présentent de très-utiles applications dans les arts,

101. *De l'écoulement des liquides par les orifices en minces parois.*—Les parois des vases qui contiennent des liquides supportent en général deux pressions (*Fig.* 124) : l'une, qui s'exerce de dedans en dehors, et qui repousse la paroi ; l'autre, qui s'exerce de dehors en dedans, et qui tend à l'enfoncer. La première résulte des pressions de la colonne liquide qui s'élève au dessus du point de la paroi que l'on considère, et du poids que cette colonne elle-même peut

supporter à son sommet ; la seconde est la pression atmosphérique, ou en général la pression du milieu qui enveloppe le vase. Lorsqu'on perce une ouverture, soit dans le fond, soit dans la paroi latérale, il y a une condition pour que le liquide s'écoule : c'est que la pression intérieure, qui tend à produire l'écoulement, soit plus grande que la pression extérieure, qui tend à l'empêcher. La nécessité de cette condition est évidente d'elle-même ; mais elle peut aussi se montrer par l'expérience. Une éprouvette OR (*Fig.* 140) est remplie d'eau, on en recouvre l'ouverture d'un petit disque de papier joseph; on la retourne, et la colonne liquide reste suspendue : l'écoulement est impossible, à moins que la hauteur de l'éprouvette ne soit de plus de 32 pieds; car à l'ouverture, la pression de haut en bas, qui est due au poids du liquide, est moindre que la pression de bas en haut, qui est due à l'atmosphère. Si l'éprouvette était remplie de mercure, il suffirait de lui donner un peu plus de 28 pouces de hauteur, pour que le liquide pût s'écouler. En faisant cette expérience avec un tube dont l'ouverture est très-étroite, on peut supprimer le disque de papier joseph, ou tout autre obturateur analogue ; mais si l'ouvertnre a seulement deux ou trois millimètres de diamètre, l'obturateur devient indispensable. La pression de l'air s'exerçant immédiatement sur la surface mobile du liquide, en refoule toutes les parties avec plus ou moins de force; et quand cette surface a quelque étendue, elle est déformée et enfoncée par l'air, qui s'ouvre un passage pour gagner le sommet du tube. On dit alors que la colonne liquide est *divisée*.

L'étendue nécessaire pour pour produire ce phénomène dépend de l'intensité de la pression, de la nature du liquide, et aussi de la nature des parois; mais en général les colonnes plus étroites que 1 millimètre ne se divisent jamais. Nous considérerons toujours, dans ce qui va suivre, l'écoulement résultant d'un excès de pression, et non pas

l'écoulement irrégulier qui se produit par la division de la colonne liquide.

102. Pour déterminer les lois mathématiques de l'écoulement des fluides, on admet, en général, *l'hypothèse du parallélisme des tranches*. On conçoit un orifice en mince paroi (*Fig.* 125), horizontal ou latéral, mais qui soit très-petit par rapport aux dimensions du vase : et l'on admet que, pendant l'écoulement, toutes les molécules liquides qui composent une tranche horizontale très-mince sont animées de la même vitesse ; qu'elles descendent ensemble, sans se quitter, se moulant en quelque sorte sur les diverses sections du vase pour former une tranche plus mince ou plus épaisse, suivant que la section où elles passent est plus large ou plus étroite. D'après cette hypothèse on calcule la vitesse que doivent prendre les molécules en passant par l'orifice. M. Cauchy admet *l'hypothèse de la permanence des filets fluides*, il suppose que, la régularité de l'écoulement étant établie, toutes les molécules qui partent du même point du niveau doivent décrire la même courbe pour arriver à l'orifice, et qu'en passant aux mêmes points elles ont toujours la même vitesse. Dans tous les cas, le niveau supérieur étant variable, la pression qui s'exerce à l'orifice est elle-même variable, et produit des vitesses différentes. L'écoulement le plus simple que l'on puisse considérer est celui qui s'établit sous une pression constante.

103. *Divers moyens de produire une pression constante.*— Nous indiquerons seulement trois moyens généraux de produire des pressions constantes : 1° par le *trop plein*, 2° par le *flotteur de M. de Prony*, 3° par le *vase de Mariotte.*

104. Le *trop plein* peut s'obtenir de diverses manières ; la plus simple et la plus exacte paraît être la suivante : R (*Fig.* 120) est un réservoir, *s* une soupape qui se lève plus ou moins, *t* un tube, *cc'* une caisse, et *o* l'ouverture par laquelle le liquide s'écoule. On donne de l'eau par la soupape *s*, autant qu'il s'en écoule par l'ouverture *o*. Le

niveau se maintient exactement à la hauteur *nn'*; le tube *t* et la caisse *cc'* sont destinés à empêcher l'agitation que pourrait produire l'eau par sa chute : car les plus faibles mouvemens, même à la surface supérieure, peuvent avoir une influence sur la dépense.

105. *Flotteur de M. de Prony.* — ABCD (*Fig.* 129 et 130) est une grande cuve rectangulaire divisée en trois compartimens $C_1$, $C_2$, $C_3$ par les deux petites cloisons *cc'*; le niveau de l'eau passe au dessus de ces cloisons; F et F sont les deux vases composant le flotteur; ils plongent chacun dans l'un des compartimens extrêmes, et servent à faire passer l'eau dans le compartiment moyen qui fournit à l'écoulement; *l l* est une grande plaque de métal dans laquelle s'ajustent les orifices et les ajutages par lesquels on veut faire passer le liquide : elle est vue de face *figure* 129, et de profil *figure* 130.

Les vases F, F du flotteur sont en feuilles de cuivre très-minces; leurs parois sont renforcées par de petites tringles de fer *t*, qui viennent s'adapter aux grandes tringles T : celles-ci forment un rectangle supporté par le flotteur, et soutenant lui-même un vase V, qui est disposé au dessous de la cuve, et un entonnoir *er* destiné à conduire dans le vase les produits de l'écoulement.

L'équilibre étant établi, si l'on enlevait 10 kilogrammes d'eau dans l'intérieur de la cuve, le niveau baisserait d'une certaine quantité : mais le même poids de 10 kilogrammes placé dans le flotteur, soit en haut dans les vases F, F, soit en bas dans le vase V, ramenerait le niveau exactement au même point; car le flotteur, devenu plus pesant de 10 kilogrammes, déplacerait de plus 10 kilogrammes d'eau, et produirait donc en s'enfonçant le même effet que si l'on avait remis dans la cuve les 10 kilogrammes d'eau que l'on en avait ôtés. Pour avoir le même niveau pendant l'écoulement, tout se réduit donc à charger le flotteur à chaque instant d'un poids égal au poids de l'eau qui coule par l'o-

rifice. C'est là précisément ce que fait l'entonnoir *er*, en conduisant dans le vase V toute l'eau qui sort de la cuve. Il est vrai que le liquide qui est en chemin entre l'orifice et l'entonnoir n'exerce pas encore sa pression pour rétablir le niveau ; mais il est facile de tenir compte de la différence.

106. *Vase de Mariotte.* — Cet appareil est représenté (*Fig.* 126, 127 et 128). *t* est un tube, qui peut glisser dans le bouchon de la tubulure *b*, et dont l'extrémité inférieure est successivement ou abaissée au point *p*, au dessous du niveau *nv* de l'ouverture latérale, ou relevée au point *h*, au dessus du même niveau. L'ouverture latérale est assez étroite pour que la colonne liquide ne puisse pas se diviser. Le tube étant en *p* (*Fig.* 126), et complètement rempli d'eau ainsi que le flacon, il est clair que le liquide doit s'écouler par l'orifice latéral *v* ; car la pression intérieure se compose de la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet du tube et de la pression due au poids de la colonne liquide *sn*, tandis que la pression extérieure n'est que la pression atmosphérique. Le liquide jaillit en effet, et le niveau tombe rapidement dans l'intérieur du tube depuis le point *s* au point *n* ; là il s'arrête, et tout écoulement cesse. Le vase reste plein, l'orifice *v* reste ouvert, et cependant pas une goutte de liquide ne s'échappe. Sur toute l'étendue de la couche horizontale *n'nv* la pression étant la même qu'au point *n*, c'est-à-dire une pression atmosphérique, il n'y a plus de raison pour que le liquide s'écoule. Sur une autre couche, telle que *c'c*, la pression n'est pas due seulement au poids de la colonne supérieure, mais elle est égale à une pression atmosphérique diminuée de la colonne *c'n'*. Que l'on fasse maintenant glisser le tube pour le remonter jusqu'au point *h* (*Fig.* 127) ; à l'instant même l'écoulement recommence, des bulles d'air se forment à l'extrémité inférieure du tube, se gonflent, se détachent, et montent à la file dans la partie supérieure du vase. L'écoulement continue de la sorte, avec *une vitesse constante*,

pendant tout le temps que le niveau du liquide descend depuis le sommet du vase jusqu'en $h$; car la pression sur la couche $n'nv$ se compose alors de la pression atmosphérique qui s'exerce en $h$, et de la pression qui est due au poids de la colonne $hn$; pressions qui restent l'une et l'autre constantes, aussi long-temps que le niveau n'est pas tombé jusqu'en $h$; à partir de cet instant la vitesse d'écoulement diminue de plus en plus jusqu'à devenir tout-à-fait nulle quand le niveau est arrivé au point $n$. Le vase de Mariotte peut être présenté sous une grande variété de formes, soit avec un orifice latéral pour l'écoulement, soit avec un orifice horizontal comme l'indique la *figure* 128.

107. *Théorème de Torricelli.* — Dans un appareil où la condition de l'écoulement est remplie, où l'hypothèse du parallélisme des tranches ou de la permanence des filets peut avoir lieu; et où le niveau est maintenu constant par l'un des moyens que nous venons d'indiquer, la loi de l'écoulement est déterminée par le théorème suivant, que l'on appelle théorème de Torricelli : *Les molécules, en sortant de l'orifice, ont la même vitesse que si elles fussent tombées librement dans le vide, d'une hauteur égale à la hauteur du niveau au dessus du centre de l'orifice.* Il résulte de cette proposition trois conséquences importantes.

Premièrement. *La vitesse d'écoulement ne dépend que de la profondeur de l'orifice au dessous du niveau, et nullement de la nature du liquide;* car tous les corps en tombant de la même hauteur dans le vide, acquièrent la même vitesse. Ainsi le mercure et l'eau (*Fig.* 144) prennent la même vitesse, lorsqu'ils s'écoulent par des orifices qui sont à la même profondeur au dessous du niveau. Cependant le mercure est poussé par une pression bien plus grande que l'eau. La profondeur de l'orifice étant, par exemple, de 32 pieds, l'eau ne serait poussée que par la pression d'une atmosphère, tandis que le mercure serait poussé par une pression de 13 atmosphères et demie.

Secondement. *Pour un même liquide les vitesses d'écoulement sont comme les racines carrées des profondeurs des orifices au dessous du niveau*; car les vitesses des corps pesans sont entre elles comme les racines carrées des hauteurs d'où ils sont tombés. Ainsi dans un vase qui aurait, par exemple, cent pieds de hauteur, si l'on perçait deux orifices, l'un à un pied de profondeur et l'autre sur le fond à cent pieds de profondeur, la vitesse du liquide, sortant par le dernier, serait seulement dix fois plus grande que la vitesse du liquide sortant par le premier. Cependant la seconde pression serait cent fois plus grande que la première.

Troisièmement. Si la pression qui s'exerce au sommet de la colonne liquide était plus grande que la pression extérieure qui s'oppose à l'écoulement, cet excès de pression serait équivalent au poids d'une colonne *de même* liquide d'une certaine hauteur; et alors la vitesse des molécules qui s'écoulent serait la même que si elles fussent tombées du sommet de cette seconde colonne, qu'il faut concevoir comme ajoutée au dessus de la première. Ce serait le contraire si la pression extérieure était plus grande que la pression qui s'exerce au dessus du liquide.

108. *Contraction de la veine fluide.* — Avant de vérifier par l'expérience le théorème de Torricelli et les trois autres lois de l'écoulement qui en sont une conséquence, nous devons faire connaître le phénomène curieux de la *Contraction de la veine*. Supposons que le liquide jaillisse d'un vase par un orifice circulaire percé en mince paroi. La veine fluide sera verticale ou parabolique suivant que l'ouverture sera faite au fond du vase ou sur sa paroi latérale : dans les deux cas on sait qu'elle se moule en quelque sorte sur la forme de l'orifice, et qu'elle s'étend à une assez grande distance avant de se diviser et de s'éparpiller en gouttes. Entre la paroi et le point où elle se divise, la veine fluide prend une surface polie, et une forme permanente; malgré le mouvement rapide des molécules qui se succè-

dent incessamment, elle offre l'apparence d'une veine de cristal qui serait parfaitement immobile. L'orifice ayant, par exemple, un centimètre de diamètre, la section de la veine est d'un centimètre à son origine, mais à quelques millimètres de distance, la section diminue, et elle diminue de plus en plus sans cesser d'être circulaire jusqu'à une certaine limite, où se trouve ce que l'on appelle la *section contractée;* passé ce point, la section augmente de nouveau jusqu'à l'instant où la veine se divise par l'accélération de la pesanteur et par la présence de l'air. Dans les *figures* 135 138, *ss'* est la section contractée.

L'écoulement qui se fait par de grandes ouvertures présente aussi le phénomène de la contraction de la veine, mais sur une autre échelle et avec d'autres circonstances extrêmement remarquables. Pour en donner une idée, je citerai ici, sur les veines carrées, quelques observations qui sont dues à MM. Poncelet et Lesbros, capitaines du génie; ces observations sont tirées d'un immense travail qui a été exécuté par ces deux habiles ingénieurs à l'École d'application de Metz, et dans lequel on trouve une foule d'expériences du plus grand intérêt, parce qu'elles sont nouvelles, et parce qu'elles ont été dirigées et décrites avec une précision qui ne laisse rien à désirer.

Dans l'une de ces expériences, la veine sort par un orifice vertical, percé en minces parois, de forme carrée, ayant 20 centimètres de côté, sous une charge de 1m,68, prise au dessus de la base de l'orifice.

Les résultats en sont représentés dans les *figures* 131, 132, 133 et 134. La *figure* 131 est la section de l'orifice, et les *figures* 132, 133 et 134 représentent les sections de la veine par des plans verticaux parallèles à l'orifice, et pour des distances qui sont respectivement de 20, 30 et 40 centimètres.

La lettre H indique partout la partie supérieure de la veine. En comparant d'abord la *figure* 131 à la *figure* 134, l'on reconnaît le phénomène de l'*inversion de la veine*, c'est-

à-dire que vis-à-vis les angles de l'orifice sont les milieux des côtés de la veine, et réciproquement vis-à-vis les angles de la veine sont les milieux des côtés de l'orifice. Cette inversion n'est pas subite : elle se fait par degrés, comme on peut le voir sur les *figures* 132 et 133, qui représentent les sections faites à 20 et à 30 centimètres. A une petite distance de l'orifice les angles du carré disparaissent et sont remplacés par de petites facettes sensiblement planes, tandis que les côtés du carré s'infléchissent en dedans et paraissent un peu concaves lorsqu'on les regarde du dehors. A mesure que la veine s'éloigne de l'orifice, les facettes s'élargissent de plus en plus et se creusent à leur tour, tandis que les côtés diminuent; de telle sorte qu'à 20 centimètres de distance (*Fig.* 132) la section de la veine est octogonale : ses huit côtés sont presque égaux et également infléchis vers le centre; seulement on remarque en B, à la partie inférieure, une irrégularité singulière : c'est une arête saillante de rebroussement vers le milieu du côté. Au delà de 20 centimètres ces effets continuent dans le même sens; et à 30 centimètres (*Fig.* 133), les faces correspondantes aux côtés de l'orifice ont disparu complètement ; celle d'en haut et celle d'en bas se sont arrondies, tandis que les deux latérales se sont creusées d'une manière assez bizarre. Enfin, à 40 centimètres toutes les arêtes de rebroussement s'effacent, et la section de la veine n'a plus que quatre côtés un peu courbés en dedans et sensiblement égaux. Cette figure se conserve au delà de 40 centimètres, seulement; les faces se creusent davantage et les pointes deviennent plus saillantes.

Le maximum de contraction, ou plutôt la section contractée, se trouve à 30 centimètres : c'est la section de la *figure* 133. Sa surface est seulement les 0,56 de celle de l'orifice; c'est-à-dire que pour cette veine le coefficient de contraction est 0,56.

Quand les orifices ne sont pas circulaires, les points de la

surface de la veine, qui sont les plus rapprochés de l'axe, et qui forment, à proprement parler, la section contractée, se trouvent en général sur une courbe à double courbure.

Plusieurs physiciens ont essayé de déterminer, soit directement, soit indirectement, le rapport qui existe entre la section contractée et la section de l'orifice, et tous s'accordent à conclure que pour les orifices qui ont seulement quelques centimètres de côté ce rapport est compris entre 0,6 et 0,7; c'est-à-dire qu'à son *minimum* la section de la veine n'est plus que les 6 dixièmes, ou les 7 dixièmes, ou environ les $\frac{2}{3}$ de la surface de l'ouverture. C'est ce rapport que l'on appelle *le coefficient de contraction.*

La distance de la section contractée à la face intérieure de la paroi est, en général, un peu plus grande que le rayon de l'orifice quand l'orifice est petit; mais, pour des ouvertures plus grandes, la section contractée paraît s'éloigner davantage.

Ces résultats sont à peu près indépendans de la forme de l'orifice et de la pression sous laquelle le liquide s'écoule. Seulement, pour des orifices dont le diamètre est moindre qu'un centimètre, la contraction est moindre que 0,7; ce qui tient sans doute à ce que l'épaisseur des parois devient alors sensible, et produit un effet analogue à l'effet des ajutages, dont nous parlerons plus loin.

Lorsque la pression qui s'exerce au dessus d'un orifice horizontal est très-faible, il se fait une contraction d'une autre espèce (*Fig.* 139); le liquide remplit encore l'orifice, mais il glisse des parois vers le centre pour former un filet qui est quelquefois très-petit. C'est ce que M. Hachette appelle une *veine secondaire.*

La contraction de la veine résulte de la convergence des divers filets fluides qui la composent. Si toutes les molécules se présentaient à l'orifice avec des vitesses parallèles à l'axe de la veine, il n'y aurait point de contraction, parce qu'il n'y aurait point de raison pour qu'elles fussent déviées de

la ligne directe de leur mouvement; mais le liquide, appelé par l'écoulement, et poussé par la pression, se précipitant vers l'orifice dans toutes les directions possibles, il faut bien que la convergence de ces vitesses se manifeste au dehors par un rétrécissement. Cette cause de la contraction ne peut être qu'indiquée; le calcul ne saurait y atteindre.

La division de la veine à une certaine distance de l'orifice n'est pas seulement produite par la présence de l'air; elle a lieu dans le vide, et elle résulte de l'accélération due à la pesanteur. Deux molécules qu'on laisserait tomber du même point, à une seconde d'intervalle, seraient, au point de départ, à 15 pieds l'une de l'autre; mais, après trois secondes, elles seraient à 65 pieds de distance, et après une minute, elles seraient à 1785 pieds : c'est là précisément ce qui arrive aux différentes parties du liquide qui composent la veine. Deux molécules se suivent en passant par l'orifice, et après un certain temps, la première prend une avance sensible sur la seconde.

109. *Vérification expérimentale des lois de l'écoulement.* —L'appareil à flotteur de M. de Prony est un des plus commodes que l'on ait employés jusqu'à ce jour, dans les recherches exactes sur les mouvemens des fluides. Pour vérifier la première loi, ou le théorème de Torricelli, on adapte à la plaque (*Fig.* 129 et 130) un orifice en mince paroi d'une grandeur connue, d'un centimètre, par exemple; on mesure la hauteur du niveau au dessus de son centre, et on observe la *dépense* pendant un temps très-exactement déterminé. Cette dépense étant connue et évaluée en litres, il est très-facile d'en déduire le nombre L des litres qui se sont écoulés en 1″; alors on peut considérer ce volume comme un cylindre qui est passé par l'orifice, à peu près comme un fil passe à la filière, et dont la base est par conséquent la surface S de la veine contractée, tandis que sa longueur est l'espace parcouru en 1″, c'est-à-dire la vitesse V de l'écoulement. D'où l'on déduit :

$$SV = L\text{, ou } V = \frac{L}{S}$$

C'est la vitesse expérimentale, ou la vitesse effective.

D'une autre part, la vitesse théorique, donnée par le théorème, est :

$$V = \sqrt{2gh}$$

$h$ étant la hauteur du niveau, au dessus du centre de l'orifice.

C'est de l'égalité de ces deux vitesses que dépend la vérité du théorème de Torricelli. Comme il est très-difficile de mesurer directement le diamètre de la veine contractée pour en déduire sa surface S, on trouve en général de petites différences; tantôt la vitesse effective est plus grande que la vitesse théorique, tantôt elle est plus petite : mais, pour les petits orifices, les deux résultats sont si voisins, qu'il suffit d'augmenter ou de diminuer un peu la valeur de S pour les rendre tout-à-fait identiques; c'est même de cette manière que l'on a déterminé la valeur de la contraction de la veine. Ainsi, dans ce cas, le théorème de Torricelli paraît vrai; il donne la vitesse des molécules liquides qui s'écoulent, mais seulement la vitesse dont elles sont animées à l'instant où elles traversent la section contractée; avant et après cet instant elles ont une moindre vitesse, puisque la section de la veine offre une plus grande surface. Pour les grands orifices, MM. Poncelet et Lesbros ayant mesuré avec une grande précision, et la section contractée et la dépense dans un temps donné, il leur a été facile d'en déduire rigoureusement la vitesse effective, et leurs résultats prouvent que, dans ce cas, le théorème de Torricelli ne donne pas exactement la vitesse du liquide dans la section contractée.

Il est facile de voir comment les autres lois de l'écoulement peuvent être vérifiées, au moyen du même appareil, et comment on peut constater aussi que la courbure du jet est une *parabole*, dont l'amplitude augmente avec la vitesse initiale.

110. *Des ajutages, et de leur influence sur l'écoulement.* — On appelle *ajutages* des tuyaux de diverses formes, ou des plaques courbes, percées de diverses manières, qui s'ajustent aux orifices en minces parois, pour donner passage au liquide qui s'écoule.

Le plus simple des ajutages est celui qui a la forme exacte que prend la veine, depuis l'orifice jusqu'à la section contractée. Lorsqu'il est travaillé avec soin et que sa surface intérieure est bien polie, il n'exerce aucune influence sur la dépense.

Une paroi courbe, percée d'un orifice, ne donne pas la même dépense qu'une paroi plane, percée d'un orifice de même grandeur : elle donne une dépense plus grande quand sa concavité est tournée vers l'intérieur (*Fig.* 136), et une dépense moindre quand elle est tournée vers l'extérieur (*Fig.* 137).

Dans les *ajutages cylindriques* de même diamètre que les orifices en minces parois auxquels ils sont appliqués, il se produit un phénomène singulier : tantôt la veine fluide reste *libre* et passe dans l'ajutage sans le toucher, tantôt elle devient *adhérente*, et l'écoulement se fait à *gueule bée*, c'est-à-dire à plein tuyau. Dans le premier cas, la présence de l'ajutage n'a d'influence ni sur la vitesse ni sur la dépense; il ne peut produire aucun effet, puisqu'il n'a aucun point de contact avec le liquide. Dans le second cas, l'adhérence qui s'établit entre la surface de la veine et les parois de l'ajutage détermine une augmentation de vitesse et une augmentation de dépense. La dépense du premier cas est à celle du second comme 100 est à 133, pourvu toutefois que le diamètre de l'ajutage soit à peu près le quart de sa longueur. Ce phénomène dépend de plusieurs causes, et surtout de la pression : sous de faibles charges, la veine est toujours adhérente, même pour les ajutages très-courts; sous de grandes pressions, la veine reste libre; et sous des pressions intermédiaires on peut à volonté produire l'écou-

lement à veine libre ou à veine adhérente ; il suffit d'un léger obstacle pour établir l'adhérence, et il suffit quelquefois du moindre choc pour que la veine se détache des parois de l'ajutage et coule librement.

Quand l'adhérence est établie, la veine fluide se contracte dans l'ajutage, comme elle ferait à l'air libre (*Fig.* 121); on peut s'en assurer en faisant l'expérience avec un tube de verre, et l'on peut s'en assurer encore en donnant à l'ajutage la forme elle-même de la veine contractée (*Fig.* 122); avec ce rétrécissement, la dépense est encore 133, comme elle était auparavant.

Un *ajutage conique* peut donner une dépense encore plus grande que l'ajutage cylindrique : il paraît que l'on obtient la plus grande dépense possible, en prenant deux troncs de cône opposés (*Fig.* 123), de telle sorte que *vv' ss'* prenne exactement la forme de la veine, que *m n* égale trois fois *o m*, et que TT' soit les $\frac{17}{8}$ de *ss'*. Alors la dépense de l'orifice étant représentée par 100, celle de l'ajutage s'élève à peu près à 150.

S'il y a des ajutages qui augmentent la dépense, il est très-facile d'en construire aussi qui la diminuent dans un très-grand rapport. Tout renflement dans un ajutage conique ou cylindrique produit une diminution de vitesse ; les *réflexions*, les *remous*, les chocs des molécules animées de mouvemens contraires, produisent une grande complication de phénomènes, et en dernier résultat une grande diminution dans la dépense. Les varices peuvent être assimilées à des renflemens de cette espèce, et s'il est difficile d'analyser leur influence complète sur les phénomènes de la vie, il est du moins permis de conclure que, dans tous les cas, elles retardent la vitesse de la circulation.

C'est surtout aux recherches de Bossut, de Dubuat, de Venturi, de M. de Prony et de M. Hachette, que nous devons les résultats les plus nouveaux du mouvement des liquides, soit par les orifices en minces parois, soit par les ajutages.

111. *De l'unité de mesure dans la distribution des eaux.* — L'unité de mesure, pour les eaux courantes, est connue sous le nom de *pouce de fontainier* ou *pouce d'eau.* C'est la quantité d'eau qui coule, en une minute, par un orifice circulaire d'un pouce de diamètre, percé dans une paroi verticale, avec une charge d'eau de sept lignes sur le centre de l'orifice, ou d'une ligne au dessus de son point culminant. Le volume d'eau qui s'écoule dans de telles circonstances est de 14 pintes anciennes de Paris, ou 672 pouces cubes par minute; ce qui revient à 19,2$^{\text{mèt. cub.}}$ en 24 heures. Un demi-pouce d'eau est la quantité d'eau qui s'écoule par un orifice d'un demi-pouce de diamètre, dont le centre supporte également une pression de 7 lignes : d'où il résulte qu'en volume ou en poids le demi-pouce est véritablement le quart du pouce; car sous la même pression un orifice d'un diamètre moitié donne une dépense qui n'est que le quart. Une *ligne d'eau* n'est, par la même raison, que la 144$^{e}$ partie du pouce, ou $\frac{19{,}2^{\text{m c.}}}{144}$ en 24 heures.

Il résulte de ce que nous avons vu sur les ajutages, qu'un propriétaire auquel on accorde une certaine quantité d'eau, et par conséquent un orifice en mince paroi d'une certaine grandeur, pourrait tirer du même orifice un volume d'eau une fois et demie plus grand; ainsi, dans les *concessions*, il importe non-seulement de régler le diamètre de l'ouverture, mais encore de définir l'espèce d'ajutage que l'on peut employer.

Il paraît qu'à Paris la dépense journalière est d'environ 10 mille mètres cubes; ce qui fait à peu près 15 litres par tête.

112. *Des jets d'eau.* — Il y a des jets d'eau qui s'élèvent verticalement de bas en haut, et il y en a d'autres qui s'élèvent en gerbes, suivant des paraboles de diverses amplitudes. Les orifices qui donnent naissance aux jets verticaux sont percés dans des parois horizontales, et ceux qui donnent naissance aux jets paraboliques sont percés dans des

parois diversement inclinées. Dans tous les cas, la direction du jet est produite par la pesanteur, qui est toujours verticale, et par la pression ou la force impulsive, qui est toujours perpendiculaire à la paroi. D'après le théorème de Torricelli (107), les molécules liquides ayant à l'orifice la même vitesse que si elles fussent tombées d'une hauteur égale à la hauteur du niveau du liquide dans le réservoir, on voit que cette vitesse, dirigée de bas en haut, serait précisément capable de faire remonter toutes les molécules jusqu'à la hauteur de ce niveau, d'où elles sont censées descendues (40). Ainsi, la hauteur du jet vertical serait toujours égale à l'élévation du niveau au dessus de l'orifice. Mais il y a plusieurs causes qui empêchent les eaux jaillissantes d'atteindre à cette hauteur théorique; elles éprouvent des frottemens contre les parois des tuyaux qui les amènent depuis le réservoir jusqu'à l'orifice et contre l'orifice lui-même dont elles rasent les parois avec une grande vitesse; elles éprouvent la résistance de l'air atmosphérique, et enfin les eaux qui retombent du point le plus élevé du jet retombent sur les eaux ascendantes, et leur enlèvent du mouvement. Pour réduire toutes ces résistances à leurs moindres valeurs, on a coutume de suivre dans la pratique les règles suivantes :

1°. On donne aux tuyaux de conduite un diamètre qui dépend de leurs longueurs, de la grandeur de l'orifice et de la hauteur du réservoir. Le diamètre pourra être calculé par les formules que nous donnerons tout à l'heure sur les tuyaux de conduite. On s'arrange pour que la vitesse de l'eau dans les tuyaux soit tout au plus de 2 ou 3 décimètres par seconde.

2°. On fait l'orifice circulaire et on le perce en *mince paroi* dans une plaque que l'on appelle la *platine*. Quand on peut se dispenser de recourber le tuyau, la platine est ajustée vers son extrémité; elle forme une partie de sa paroi latérale supérieure. Quand on est forcé de recourber le tuyau,

on le recourbe en haut, en l'arrondissant, et alors la platine en forme l'extrémité. La platine est plane ou courbée en forme de calotte convexe, suivant que l'on veut avoir un jet vertical, ou une gerbe à plusieurs jets paraboliques.

Tout ajutage, cylindrique ou conique, donne un jet moins élevé que les orifices en minces parois.

Ces conditions étant remplies, on admet, d'après les expériences de Mariotte, que le jet s'élève à une hauteur de 5 pieds pour une hauteur de réservoir de 5 pieds 1 pouce; et qu'en général, pour avoir la hauteur du réservoir, il faut, à la hauteur H du jet, évaluée en pieds; ajouter autant de pouces qu'il se trouve d'unités dans $\frac{H}{5}$ élevé au carré. Ainsi un jet de 100 pieds suppose un réservoir de 100 pieds, plus 400 pouces, ou enfin de 133 pieds 4 pouces.

113. *Des tuyaux de conduite.* — La conduite des eaux est un point important d'économie publique et d'économie industrielle; mais en même temps, c'est une question d'hydraulique qui présente de grandes difficultés. Quelques centimètres de plus ou de moins, dans le diamètre des tuyaux qui distribuent les eaux dans une grande ville, correspondent à un capital de plusieurs millions, et il faut remplir la double condition de les faire assez larges, pour qu'ils fournissent toute la quantité d'eau nécessaire, et assez étroits pour qu'ils coûtent le moins possible. Beaucoup d'ingénieurs habiles ont fait sur ce sujet des recherches théoriques et expérimentales, et les travaux récens de M. de Prony, de M. Girard et de M. Navier ont jeté un grand jour sur cette branche de l'hydraulique. Nous nous contenterons de rapporter ici les résultats qui peuvent être d'une application plus usuelle et plus immédiate. M. de Prony est parvenu à la formule suivante pour l'écoulement de l'eau dans les tuyaux de fonte, dont se composent les conduites:

$$U = 26{,}79 \sqrt{\frac{DH}{L}}$$

D est le diamètre du tuyau ;

L est sa longueur ;

H est la hauteur du niveau de l'eau dans le réservoir au dessus de l'extrémité du tuyau par laquelle l'eau s'écoule. Si cette extrémité était elle-même submergée, il faudrait retrancher sa profondeur au dessous de l'eau.

U est la vitesse de l'eau à l'orifice ou dans toute la longueur du tuyau, ce qui est la même chose ; car on suppose qu'il a partout le même diamètre.

Pour toutes ces grandeurs, l'unité de mesure est le mètre.

Pour appliquer cette formule, il faut que $\frac{D}{L}$ ne dépasse pas $\frac{1}{100}$, c'est-à-dire que la longueur du tuyau soit au moins de cent fois son diamètre ; et il faut encore que le diamètre ne soit pas lui-même très-petit : s'il n'avait que quelques millimètres ou même 1 centimètre, la formule donnerait sans doute des résultats trop forts. Dans ces limites, elle a été vérifiée par M. de Prony avec tant de soin que l'on peut la regarder comme très-exacte ; elle s'accorde avec l'expérience, pour des conduites qui ont jusqu'à 2280 mètres de longueur. Il nous a semblé nécessaire de former, au moyen de cette formule, un tableau contenant les résultats dont on peut avoir le plus souvent besoin dans la pratique.

La première colonne verticale contient les valeurs de H ou les pressions qui s'exercent sur l'orifice d'écoulement ; elles vont en croissant de 2 décimètres en 2 décimètres, depuis 2 décimètres jusqu'à 10 mètres.

La première colonne horizontale contient les valeurs de $\frac{D}{L}$ ou les rapports du diamètre du tuyau à sa longueur ;

## TABLE DES VITESSES DE L'EAU

| | 0,001 | 0,0015 | 0,002 | 0,0025 | 0,003 | 0,0035 | 0,004 | 0,0045 | 0,00 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,2 | 0,379 | 0,464 | 0,536 | 0,599 | 0,656 | 0,709 | 0,758 | 0,804 | 0,84 |
| 0,4 | 0,536 | 0,656 | 0,758 | 0,847 | 0,928 | 1,002 | 1,072 | 1,137 | 1,19 |
| 0,6 | 0,656 | 0,804 | 0,928 | 1,038 | 1,137 | 1,228 | 1,312 | 1,392 | 1,46 |
| 0,8 | 0,758 | 0,928 | 1,072 | 1,198 | 1,312 | 1,418 | 1,515 | 1,607 | 1,69 |
| 1,0 | 0,847 | 1,038 | 1,019 | 1,340 | 1,467 | 1,585 | 1,694 | 1,797 | 1,89 |
| 1,2 | 0,928 | 1,137 | 1,312 | 1,467 | 1,607 | 1,736 | 1,856 | 1,969 | 2,07 |
| 1,4 | 1,002 | 1,228 | 1,418 | 1,585 | 1,736 | 1,875 | 2,005 | 2,126 | 2,24 |
| 1,6 | 1,072 | 1,312 | 1,515 | 1,694 | 1,856 | 2,005 | 2,143 | 2,273 | 2,39 |
| 1,8 | 1,137 | 1,392 | 1,607 | 1,797 | 1,969 | 2,126 | 2,273 | 2,411 | 2,54 |
| 2,0 | 1,198 | 1,467 | 1,694 | 1,894 | 2,075 | 2,241 | 2,396 | 2,542 | 2,67 |
| 2,2 | 1,256 | 1,539 | 1,777 | 1,987 | 2,176 | 2,351 | 2,513 | 2,666 | 2,81 |
| 2,4 | 1,312 | 1,607 | 1,856 | 2,075 | 2,273 | 2,455 | 2,625 | 2,784 | 2,93 |
| 2,6 | 1,366 | 1,673 | 1,932 | 2,160 | 2,366 | 2,556 | 2,732 | 2,898 | 3,05 |
| 2,8 | 1,418 | 1,736 | 2,005 | 2,241 | 2,455 | 2,652 | 2,835 | 3,007 | 3,17 |
| 3,0 | 1,467 | 1,797 | 2,075 | 2,320 | 2,542 | 2,745 | 2,935 | 3,113 | 3,28 |
| 3,2 | 1,515 | 1,856 | 2,143 | 2,396 | 2,625 | 2,845 | 3,031 | 3,215 | 3,38 |
| 3,4 | 1,562 | 1,913 | 2,209 | 2,470 | 2,706 | 2,922 | 3,124 | 3,314 | 3,49 |
| 3,6 | 1,607 | 1,969 | 2,273 | 2,542 | 2,784 | 3,007 | 3,215 | 3,410 | 3,59 |
| 3,8 | 1,651 | 2,023 | 2,335 | 2,611 | 2,860 | 3,089 | 3,303 | 3,503 | 3,69 |
| 4,0 | 1,694 | 2,075 | 2,396 | 2,679 | 2,935 | 3,170 | 3,389 | 3,594 | 3,78 |
| 4,2 | 1,736 | 2,126 | 2,455 | 2,745 | 3,007 | 3,248 | 3,472 | 3,683 | 3,88 |
| 4,4 | 1,777 | 2,176 | 2,513 | 2,810 | 3,078 | 3,325 | 3,554 | 3,770 | 3,97 |
| 4,6 | 1,817 | 2,225 | 2,570 | 2,873 | 3,147 | 3,399 | 3,634 | 3,854 | 4,063 |
| 4,8 | 1,856 | 2,273 | 2,625 | 2,935 | 3,215 | 3,472 | 3,712 | 3,937 | 4,15 |
| 5,0 | 1,894 | 2,320 | 2,679 | 2,995 | 3,281 | 3,544 | 3,789 | 4,018 | 4,236 |
| 5,2 | 1,932 | 2,366 | 2,732 | 3,055 | 3,346 | 3,614 | 3,864 | 4,098 | 4,320 |
| 5,4 | 1,969 | 2,411 | 2,784 | 3,113 | 3,410 | 3,683 | 3,937 | 4,176 | 4,402 |
| 5,6 | 2,005 | 2,455 | 2,835 | 3,170 | 3,472 | 3,751 | 4,010 | 4,253 | 4,483 |
| 5,8 | 2,040 | 2,499 | 2,885 | 3,226 | 3,534 | 3,817 | 4,081 | 4.328 | 4,562 |
| 6,0 | 2,075 | 2,542 | 2,935 | 3,281 | 3,594 | 3,882 | 4,150 | 4,402 | 4,640 |
| 6,2 | 2,109 | 2,584 | 2,983 | 3,335 | 3,654 | 3,946 | 4,219 | 4,475 | 4.717 |
| 6,4 | 2,143 | 2,625 | 3,031 | 3,389 | 3,712 | 4,010 | 4,286 | 4,546 | 4.792 |
| 6,6 | 2.176 | 2,666 | 3,078 | 3,441 | 3,770 | 4,072 | 4,353 | 4,617 | 4,867 |
| 6,8 | 2,209 | 2,706 | 3,124 | 3,493 | 3,826 | 4,133 | 4,418 | 4,686 | 4.940 |
| 7,0 | 2,241 | 2,745 | 3,170 | 3,544 | 3,882 | 4,193 | 4,483 | 4.755 | 5,012 |
| 7,2 | 2,273 | 2,784 | 3,215 | 3,594 | 3,937 | 4,253 | 4,546 | 4,822 | 5,083 |
| 7,4 | 2,305 | 2,823 | 3,259 | 3,644 | 3,992 | 4,311 | 4,609 | 4,889 | 5,153 |
| 7,6 | 2,335 | 2,860 | 3,303 | 3,693 | 4,045 | 4,369 | 4,671 | 4,954 | 5,222 |
| 7,8 | 2,366 | 2,898 | 3,346 | 3,741 | 4,098 | 4,426 | 4,732 | 5,019 | 5,291 |
| 8,0 | 2,397 | 2,935 | 3,389 | 3,789 | 4,150 | 4,483 | 4,792 | 5,083 | 5,358 |
| 8,2 | 2,426 | 2,971 | 3,431 | 3,836 | 4,202 | 4.539 | 4,852 | 5,146 | 5,425 |
| 8,4 | 2,455 | 3,007 | 3,472 | 3,882 | 4,253 | 4,594 | 4.911 | 5,209 | 5,490 |
| 8,6 | 2,484 | 3,043 | 3,513 | 3,928 | 4,303 | 4,648 | 4,969 | 5,270 | 5,555 |
| 8,8 | 2,513 | 3,078 | 3,554 | 3,974 | 4,353 | 4,702 | 5,026 | 5,331 | 5,620 |
| 9,0 | 2,542 | 3,113 | 3.594 | 4,018 | 4,402 | 4,755 | 5,083 | 5,391 | 5,683 |
| 9,2 | 2,570 | 3,147 | 3,634 | 4,063 | 4.451 | 4,807 | 5,139 | 5,451 | 5,746 |
| 9,4 | 2,597 | 3,181 | 3,673 | 4,107 | 4.499 | 4,859 | 5,195 | 5,510 | 5,808 |
| 9,6 | 2,625 | 3,215 | 3,712 | 4,150 | 4,546 | 4,911 | 5,250 | 5,568 | 5,869 |
| 9,8 | 2,652 | 3,248 | 3,751 | 4,193 | 4,594 | 4 962 | 5,304 | 5,626 | 5,930 |
| 10,0 | 2,679 | 3,281 | 3,789 | 4,236 | 4,640 | 5,012 | 5,358 | 5,683 | 5,990 |

QUI S'ÉCOULE DANS LES TUYAUX.

| 0055 | 0,006 | 0,0065 | 0,007 | 0,0075 | 0,008 | 0,0085 | 0,009 | 0,0095 | 0,01 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 889 | 0,928 | 0,966 | 1,002 | 1,038 | 1,072 | 1,105 | 1,137 | 1,168 | 1,198 |
| ,256 | 1,312 | 1,366 | 1,418 | 1,467 | 1,515 | 1,562 | 1,607 | 1,651 | 1,694 |
| 539 | 1,607 | 1,673 | 1,736 | 1,797 | 1,856 | 1,913 | 1,969 | 2,023 | 2,075 |
| 777 | 1,856 | 1,932 | 2,005 | 2,075 | 2,143 | 2,209 | 2,273 | 2,335 | 2,396 |
| 987 | 2,075 | 2,160 | 2,241 | 2,320 | 2,396 | 2,470 | 2,542 | 2,611 | 2,679 |
| 176 | 2,273 | 2,366 | 2,455 | 2,541 | 2,625 | 2.706 | 2,784 | 2,860 | 2,935 |
| 351 | 2,455 | 2,556 | 2,652 | 2,745 | 2,835 | 2,922 | 3,007 | 3,090 | 3,170 |
| 513 | 2,625 | 2,732 | 2,835 | 2,935 | 3,031 | 3,124 | 3,215 | 3,303 | 3,389 |
| 666 | 2,784 | 2,898 | 3,007 | 3,114 | 3,215 | 3,314 | 3,410 | 4,503 | 3,594 |
| 810 | 2,935 | 3,055 | 3,170 | 3,281 | 3,389 | 3,493 | 3,594 | 3,693 | 3,789 |
| 947 | 3,078 | 3,204 | 3,325 | 3,441 | 3,554 | 3,663 | 3,770 | 3 873 | 3,974 |
| 078 | 3,215 | 3,346 | 3,472 | 3.594 | 3,712 | 3.826 | 3,937 | 4,045 | 4,150 |
| 204 | 3,346 | 3,483 | 3,614 | 3,741 | 3,864 | 3,983 | 4,098 | 4,210 | 4,320 |
| 325 | 3,472 | 3,614 | 3,751 | 3,882 | 4,010 | 4,133 | 4,253 | 4,369 | 4,483 |
| 441 | 3,594 | 3,741 | 3,882 | 4,018 | 4,150 | 4,278 | 4,402 | 4,523 | 4,640 |
| 554 | 3,712 | 3,864 | 4,010 | 4,150 | 4,286 | 4,418 | 4,546 | 6,671 | 4,792 |
| 663 | 3,826 | 3,983 | 4,133 | 4,278 | 4,418 | 4,554 | 4,686 | 4,825 | 4,940 |
| 770 | 3,937 | 4,098 | 4,253 | 4,402 | 4,546 | 4,686 | 4,822 | 4 954 | 5,083 |
| 873 | 4,045 | 4,210 | 4,369 | 4,523 | 4,671 | 4,815 | 4.954 | 5,090 | 5,222 |
| 974 | 4,150 | 4,320 | 4,483 | 4,640 | 4,792 | 4,940 | 5,083 | 5,222 | 5,358 |
| 072 | 4,253 | 4.426 | 4,594 | 4,755 | 4,911 | 5,062 | 5,209 | 5,351 | 5,490 |
| 168 | 4,353 | 4,531 | 4,702 | 4,867 | 5,026 | 5,181 | 5,331 | 5,477 | 5,620 |
| 261 | 4,451 | 4,632 | 4,807 | 4,976 | 5,139 | 5,297 | 5,451 | 5,600 | 5,746 |
| 353 | 4,546 | 4,732 | 4,911 | 5,083 | 5,250 | 5,411 | 5,568 | 5,721 | 5,869 |
| 443 | 4,640 | 4,830 | 5.012 | 5,188 | 5,358 | 5,523 | 5,683 | 5,839 | 5,990 |
| 531 | 4,732 | 4,925 | 5,111 | 5,291 | 5,464 | 5,632 | 5,796 | 5,954 | 6,109 |
| 617 | 4,822 | 5,019 | 5,209 | 5,391 | 5 568 | 5,740 | 5,906 | 6,068 | 6,225 |
| 702 | 4,911 | 5,111 | 5,304 | 5,490 | 5,670 | 5,845 | 6,014 | 6,179 | 6,340 |
| 785 | 4,998 | 5,202 | 5,398 | 5,587 | 5,771 | 5,948 | 6,121 | 6,289 | 6,452 |
| 867 | 5,083 | 5,291 | 5,490 | 5,683 | 5,869 | 6,050 | 6,225 | 6,396 | 6,562 |
| 947 | 5,167 | 5,378 | 5,581 | 5,777 | 5.966 | 6,150 | 6,328 | 6,502 | 6,671 |
| 026 | 5,250 | 5,464 | 5,670 | 5,869 | 6,062 | 6,248 | 6,429 | 6.606 | 6,777 |
| 104 | 5,331 | 5,549 | 5,758 | 5,960 | 6,156 | 6,345 | 6,529 | 6,708 | 6,882 |
| 181 | 5,411 | 5,632 | 5.845 | 6,050 | 6,248 | 6,441 | 6,627 | 6,809 | 6,986 |
| 257 | 5,490 | 5,715 | 5,930 | 6,138 | 6,340 | 6,535 | 6,724 | 6,908 | 7,088 |
| 331 | 5,568 | 5,796 | 6,014 | 6,225 | 6,430 | 6,627 | 6,820 | 7,006 | 7,189 |
| 405 | 5,645 | 5,876 | 6,097 | 6,311 | 6,518 | 6,719 | 6,914 | 7,103 | 7,288 |
| 477 | 5,721 | 5,954 | 6,179 | 6,396 | 6,606 | 6,809 | 7,006 | 7,198 | 7,385 |
| 549 | 5,796 | 6,032 | 6,260 | 6,480 | 6.692 | 6,898 | 7,098 | 7,293 | 7,482 |
| 620 | 5,869 | 6.109 | 6,340 | 6,562 | 6,777 | 6 986 | 7,189 | 7,385 | 5,577 |
| 689 | 5,942 | 6,185 | 6,418 | 6,644 | 6,862 | 7,073 | 7,278 | 7,477 | 7.671 |
| 758 | 6,014 | 6,260 | 6,496 | 6,724 | 6,945 | 7,158 | 7,366 | 7,568 | 7,764 |
| 826 | 6,086 | 6,334 | 6,573 | 6,804 | 7,027 | 7,243 | 7,453 | 7,657 | 7,856 |
| 894 | 6,156 | 6,407 | 6,649 | 6,882 | 7,108 | 7,327 | 7,539 | 7,746 | 7,947 |
| 960 | 6,225 | 6.480 | 6,724 | 6.960 | 7,189 | 7,410 | 7,625 | 7,833 | 8,037 |
| 026 | 6,294 | 6,551 | 6,779 | 7,037 | 7,268 | 7.492 | 7.709 | 7,920 | 8,126 |
| 091 | 6,362 | 6,622 | 6,872 | 7,113 | 7,347 | 7,573 | 7,792 | 8,006 | 8,214 |
| 156 | 6,430 | 6,692 | 6,945 | 7,189 | 7,424 | 7,673 | 7,875 | 8,090 | 8,301 |
| 220 | 6,496 | 6,761 | 7,017 | 7,263 | 7,501 | 7,732 | 7,956 | 8,174 | 8,387 |
| 283 | 6,562 | 6,830 | 7,088 | 7,337 | 7,577 | 7,811 | 8,037 | 8,257 | 8,472 |

ce rapport va croissant de 5 dix-millièmes en 5 dix-millièmes, depuis 1 millième jusqu'à 1 centième.

Au croisement d'une colonne horizontale et d'une colonne verticale se trouve la valeur de U ou la vitesse d'écoulement correspondante aux nombres qui sont en tête des deux colonnes.

Par exemple, si on veut avoir la vitesse d'écoulement sous une pression de 5,4 mètres par un tuyau dont le diamètre, divisé par la longueur, donne 0,0045, on suivra la colonne horizontale qui commence par 5,4 jusqu'à ce qu'elle coupe la colonne verticale commençant par 0,0045; le nombre 4,176 qui se trouve au croisement indique que, dans ces circonstances, la vitesse d'écoulement est, par seconde, de 4 mètres et 176 millimètres.

Pour des nombres qui ne seraient compris ni dans la colonne verticale des pressions, ni dans la colonne horizontale des rapports du diamètre à la longueur, il faudrait *intercaler* par les méthodes ordinaires,

On peut encore résoudre le problème suivant : étant donnés, la hauteur H d'un réservoir, la longueur L de la conduite, et le nombre M de mètres cubes que l'on veut avoir par seconde, trouver le diamètre du tuyau capable de fournir cette dépense; il suffira de mettre pour H, L et M, leurs valeurs dans la formule :

$$D = 0{,}1865 \sqrt[5]{\frac{L M^2}{H}}$$

Le résultat sera, en mètres, la valeur du diamètre cherché.

114. *De l'écoulement des liquides par les tubes très-fins.* —M. Girard a fait des expériences très-curieuses sur ce sujet; nous regrettons de n'en pouvoir ici donner que les résultats généraux.

Les liquides qui ne peuvent pas *mouiller* la substance

solide des tubes cessent de s'écouler sous une pression plus ou moins considérable, suivant le diamètre du tube, et suivant sa longueur. Par exemple, sous une pression de $9^{mm},5$, le mercure a cessé de couler dans un tube de verre de $1^{mm},12$ de diamètre, et de 357 millimètres de longueur. La somme des résistances qui s'exercent contre les parois, sur cette longueur de 357 millimètres, est alors égale à la force impulsive qui résulte d'une pression de $9^{mm},5$ : il serait important de connaître la loi de ce phénomène.

Les liquides qui mouillent les tubes s'écoulent avec la même vitesse, soit qu'on plonge l'extrémité du tube dans un liquide de même nature, en tenant compte de la pression, soit qu'on la laisse libre pour que l'écoulement se fasse dans l'air.

Dans les tubes qui peuvent être mouillés, l'augmentation de température accélère la vitesse dans une proportion considérable : l'eau qui coule dans un tube de verre de $1^{mm},767$ de diamètre, et de $939^{mm}$ de longueur sous une pression de $182^{mm}$, coule, par exemple, quatre fois plus vite, quand elle est voisine du point d'ébullition, que quand elle est voisine du point de congélation. La température de moindre vitesse est la température de la glace, et non pas la température du maximum de densité. Dans les tubes qui ne peuvent pas être mouillés, l'augmentation de température n'accélère pas la vitesse.

Sous des pressions égales, et dans des tubes de même dimension, les divers liquides prennent à la même température des vitesses très-différentes; le rapport de ces vitesses varie avec la température.

M. Dubuat est, je crois, le premier qui ait observé l'influence de la chaleur sur la vitesse de l'écoulement; ensuite M. Gerstner a fait sur ce sujet un grand nombre d'expériences qui ont été publiées en 1800 dans les *Annales* de Gilbert. Ces résultats sont curieux; mais ils ne suffisent pas

pour conclure, comme fait M. Gerstner, que, si la chaleur donne plus d'activité à la végétation et à la vie, c'est seulement parce qu'elle favorise la circulation dans les vaisseaux capillaires des plantes et des corps vivans.

115. *Des injections anatomiques.* — Il y a dans l'organisation des corps vivans, pour la circulation du sang ou pour celle des autres fluides, des vaisseaux tellement nombreux et tellement déliés que l'œil le plus exercé ne peut en suivre la trace, au milieu des tissus où ils vont se ramifier et se subdiviser à l'infini. Pour les rendre perceptibles, on a imaginé depuis long-temps d'y injecter diverses substances : tantôt des substances liquides et vivement colorées, tantôt des substances susceptibles de se coaguler par le refroidissement. L'appareil le plus commode pour ces opérations délicates paraît être celui de M. Duméril; il se compose d'un long tube vertical d'un ou deux centimètres de diamètre, qui sert de réservoir; d'un second tube de quelques millimètres de diamètre, et de quelques centimètres de longueur, qui s'ajuste au bas du premier pour établir la communication; d'un tuyau de gomme élastique fortement attaché à l'extrémité du second tube et servant à diriger le jet; enfin d'un petit bec qui termine le tuyau de gomme et qui sert en quelque sorte d'entonnoir pour faire passer le liquide dans les vaisseaux les plus déliés; ce petit bec est un tube de verre effilé à la lampe. La pression est déterminée par la hauteur du liquide dans le réservoir, et pour modérer la vitesse de l'écoulement; il suffit de serrer entre ses doitgts le tuyau flexible de gomme élastique.

116. *Des pressions latérales qu'exercent les liquides en mouvement.* — Un liquide qui coule dans des ajutages ou dans des tuyaux, exerce toujours contre leurs parois une moindre pression que s'il était en repos. Daniel Bernouilli exprime cette pression qui a lieu pendant le mouvement par $H—H'$.

Pour comprendre cette formule, considérons la vitesse

effective qui anime les molécules liquides dans la section perpendiculaire à l'axe du tuyau ou de l'ajutage pour laquelle on veut calculer la pression; cette vitesse est due, par le théorème de Torricelli, à une certaine hauteur de niveau qui est la valeur de H'. Concevons ensuite que le tuyau soit coupé suivant cette même section, de telle sorte qu'elle reste ouverte et devienne elle-même l'orifice d'écoulement : alors le liquide prendrait une certaine vitesse, et la valeur de H désigne la pression qui serait capable de la produire. Cette valeur de H n'est pas nécessairement égale à la hauteur réelle du niveau au dessus du centre de la section; elle peut être un peu plus petite par l'effet de la contraction, ou un peu plus grande par l'influence des ajutages. Si H' se trouve égale à H, la pression est nulle et les parois ne supportent absolument aucun effort. Si H' est plus grand que H, la pression est négative, c'est-à-dire qu'au lieu d'une pression sur la paroi du tuyau il s'exerce une véritable *succion*. Les expériences par lesquelles on a vérifié jusqu'à présent la formule de Bernouilli ne sont ni assez nombreuses ni assez précises pour qu'on puisse l'employer avec une entière confiance. Cependant le phénomène de succion qu'elle indique est un fait remarquable sur lequel il ne peut rester aucun doute; il fut constaté par Bernouilli lui-même, et depuis il a été étudié plus particulièrement par Venturi et par M. Hachette. Voici les circonstances dans lesquelles il se produit. Nous avons vu que par un ajutage cylindrique, quand la veine est adhérente, la dépense est plus grande que par un orifice en mince paroi de même diamètre; donc la vitesse effective est plus grande que la vitesse théorique, et par conséquent H' est plus grand que H; ce qui doit produire le phénomène de la succion. En effet, si l'on perce l'ajutage d'une petite ouverture latérale pour y mettre un tube recourbé tel que $xy$ (*Fig.* 120), le liquide monte dans l'intérieur de ce tube, et la hauteur de la colonne soulevée donne la mesure de la force d'aspiration.

La dépense étant plus grande encore par l'ajutage à double cône qui est représenté *figure* 123, et dont nous avons donné les dimensions (110), l'aspiration doit être encore plus grande, son *maximum* doit être en *s s'* à la section de la veine contractée, et à partir de là elle doit diminuer à mesure que l'on s'approche de l'extrémité TT'. C'est ce qui est complètement vérifié par les expériences de Venturi : l'ajutage (*Fig.* 123) avait 88 lignes de longueur, trois tubes verticaux d'ascension venaient s'ouvrir, le premier, à 10 lignes de l'origine, sur la section contractée, le deuxième, à 36 lignes, et le troisième à 62 lignes ou à 26 lignes de l'extrémité TT'; dans le premier, le mercure est monté à 53 lignes, il est monté dans le second à 20,5 lignes; et dans le troisième, seulement à 7 lignes. Ces hauteurs correspondent respectivement à 62 pouces d'eau, à 24 pouces et à 8 pouces. La charge d'eau au dessus de l'ajutage était seulement de 32,5 pouces; ainsi la force de succion soulevait une colonne d'eau presque double de la hauteur de la chute. Quand le tube est assez court, cette colonne soulevée afflue dans l'ajutage, et se mêle à l'eau qui sort du vase pour alimenter l'écoulement. Ces effets singuliers sont représentés d'une manière assez exacte par la formule précédente. Venturi indiquait cet appareil comme un moyen d'élever l'eau à peu de frais.

117. *De la réaction qui est produite par l'écoulement des fluides.* — Concevons un vase de forme cubique, porté sur des roulettes très-mobiles, et posé sur un plan horizontal qui offre peu de frottement. Le vase rempli de liquide restera en repos, parce que toutes les pressions latérales sont égales et contraires. Mais si l'on perce la paroi pour que le liquide jaillisse latéralement, le vase sera repoussé en sens contraire, il y aura un recul semblable au recul des armes à feu ou des fusils à vent (30). Cette réaction est rendue sensible par un appareil que l'on appelle le *tourniquet hydraulique.* Il se compose d'un tube de verre de quelques

millimètres de diamètre, dont on recourbe les bouts, perpendiculairement et en sens opposés, à peu près en forme de *z*, les deux bouts sont effilés en becs très-fins. Au milieu de ce tube on en soude un autre qui doit servir de réservoir. L'appareil est suspendu à un fil; le réservoir est vertical, les branches sont horizontales, et l'écoulement qui a lieu par les extrémités produit un mouvement circulaire très-rapide.

On a cru long-temps, sur l'autorité de Newton, que le recul de cette espèce était égal au poids d'une colonne liquide ayant pour base la section contractée de la veine qui s'écoule, et pour hauteur la hauteur du niveau. Mais Daniel Bernouilli a démontré que, dans tous les cas d'écoulement, la force de réaction est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base la section contractée de la veine qui s'écoule, et pour hauteur *le double* de la hauteur du niveau. Bernouilli proposait de remonter les fleuves avec des machines fondées sur ce principe, et présentement on en voit sur le Rhône une application qui paraît assez heureuse.

118. *De l'écoulement de l'eau dans les canaux.* — Rien n'est plus variable que la vitesse de l'eau dans les lits des fleuves et des rivières : les pentes plus ou moins rapides, le frottemens latéraux, les accidens du fond et les sinuosités des rivages sont des causes qui modifient sans cesse la marche des filets liquides, et qui produisent les *remous*, les *tournans* et une foule d'autre phénomènes que l'on peut expliquer dans chaque localité, mais qu'il est impossible de calculer d'avance. Les canaux qui ont une pente uniforme, une direction rectiligne et des dimensions constantes présentent des résultats plus simples et plus généraux. Les différentes couches liquides, depuis celle de la surface jusqu'à celle du fond, sont animées de vitesses différentes, et même, dans chaque couche, les filets des bords et celui du milieu ne peuvent pas avoir la même

vitesse, à cause de l'adhérence et du frottement qui ont lieu au contact des parois. De tous les filets d'eau qui passent à chaque instant dans la section perpendiculaire d'un canal, celui qui a la plus grande vitesse est le filet qui se trouve à la surface et au milieu du lit à égale distance des deux bords. Cette vitesse *maximum* peut être déterminée au moyen d'un corps léger que l'on jette sur la surface, et qui prend à peu près le mouvement de l'eau. Or on a constaté par un grand nombre d'expériences que, si tous les filets liquides étaient animés d'une vitesse commune qui fût les 8 dixièmes de la vitesse *maximum*, le volume d'eau qui passerait dans un temps donné serait égal au volume d'eau qui passe dans le même temps, en vertu de toutes les vitesses différentes, dont les molécules sont réellement animées. Il suffit donc, pour avoir la dépense d'eau d'un canal, de multiplier la surface de sa section, par les 0,8 de sa vitesse *maximum*. Cette règle est très-simple, et paraît être suffisamment exacte pour la pratique.

Dans toutes les sections que l'on peut faire perpendiculairement au cours d'un fleuve, il passe la même quantité d'eau dans le même temps ; car c'est à cette condition que le *régime est établi*, c'est-à-dire que le niveau reste le même en chaque point, sans qu'il y ait tendance à l'accumulation ni à la dépression. Pour connaître la dépense d'un fleuve, il faudrait donc connaître la quantité d'eau qui passe dans une section quelconque. Cela revient à connaître deux choses, savoir la surface de la section et la vitesse moyenne de tous les filets qui la traversent. Mais la vitesse moyenne n'est plus ici, comme dans les canaux, les 0,8 de la vitesse *maximum;* et il serait impossible de déterminer en général le rapport qui existe entre elles, puisqu'il suffit d'un rehaussement du fond, d'un creux, d'une sinuosité du rivage, ou même d'une autre cause moins apparente, pour en changer la valeur. Ce qu'il y a de plus simple et de plus exact pour jauger un fleuve est donc de le faire passer par

un pertuis dont on connaisse les dimensions et la profondeur au dessous du niveau, ou de le faire passer sur une digue où il forme une nappe dont on puisse connaître la largeur et l'épaisseur.

119. *Divers appareils pour le mouvement des liquides.* — Comme application des principes précédens et du jeu des pressions atmosphériques, nous essaierons de faire connaître quelques machines usuelles. Nous en avons renvoyé la description à la fin du chapitre, pour ne pas interrompre l'exposition générale.

120. *Du siphon.* — Le siphon est un tube recourbé BSB′ (*Fig.* 141), BS est la *courte branche*, SB′ est la *grande branche*, AT est le tube d'aspiration, dont nous verrons plus tard l'usage : pour le moment, nous supposerons qu'il n'y soit pas. Les deux branches étant remplies de liquide, la pression est la même au point B et au point N, qui sont au même niveau; ainsi en B′ elle est plus grande de tout le poids de la colonne NB′. Le liquide s'écoule par la grande branche en vertu de cet excès de pression, et sa vitesse est la même que s'il fût tombé de la hauteur NB′.

La même cause fait continuer l'écoulement avec la même vitesse, tant qu'il y a du liquide en B. Si cette extrémité de la courte branche plonge dans un vase, le vase se vide, et la vitesse d'écoulement est toujours produite par la différence de hauteur des deux branches : en prenant pour hauteur de chacune d'elles la distance du sommet S au niveau du liquide dans lequel elle plonge. Le tube d'aspiration est destiné à *amorcer* le siphon, c'est-à-dire à le remplir de liquide pour le mettre en activité. Les *figures* 147 et 148 représentent des siphons d'une autre espèce dont on devinera facilement les effets; on les appelle des *vases de tantale.*

Le siphon n'est pas seulement d'un usage journalier dans les arts, mais il peut encore être employé avec avantage pour détourner le cours d'une rivière. En 1803, M. Lebrun

fit passer l'eau de la Moselle, de l'amont à l'aval, d'une digue qu'il s'agissait de réparer, au moyen d'un siphon de 8 centimètres de diamètre; la chute était de 1 mètre. Pour amorcer de tels siphons, on les ferme aux deux bouts, et on les remplit d'eau par le sommet.

121. *Fontaine de compression.* — V (*Fig.* 145) est un vase en cuivre à parois très-solides; T un tube qui fait corps avec le robinet R; ces deux pièces sont soudées, et leur ensemble peut se visser sur le col du vase V; *j* est l'ajutage d'écoulement, il se visse au dessus du robinet R : c'est de la grandeur de son orifice que dépend le diamètre du jet; *nn'* est le niveau de l'eau dans le vase. Au moyen d'une pompe foulante qui s'adapte à la place de l'ajutage, au dessus du robinet R, on comprime l'air dans l'espace *nAn'*. Alors la fontaine est chargée, on ôte la pompe, on visse l'ajutage, on tourne le robinet, et le liquide jaillit à une grande hauteur : à une trentaine de pieds, si l'air est seulement comprimé sous deux atmosphères, et à une centaine de pieds, si l'air est comprimé sous cinq ou six atmosphères.

Cet appareil peut être très-utile pour éteindre les incendies dès leur origine.

122. *Fontaine intermittente.* — R (*Fig.* 152) est le réservoir d'eau, *jj'* sont les ajutages d'écoulement : la figure n'en représente que deux; T est *le tube de pression :* son extrémité supérieure s'élève au dessus du niveau de l'eau du réservoir; P est le pied de la fontaine, où se trouve le secret des intermittences : on y distingue une échancrure *e* à l'extrémité inférieure du tube, et une ouverture *v* par laquelle l'eau passe du premier fond sur le second. Quand l'échancrure est à nu, l'air passe dans le tube et vient exercer une pression atmosphérique sur la surface *nn'* de l'eau du réservoir; quand l'échancrure est baignée par l'eau qui s'accumule sur le premier fond, l'air ne peut plus entrer par le tube, et la pression diminue de plus en plus

dans le réservoir. Les ajutages $j$ et $j'$ peuvent communiquer ou ne pas communiquer avec l'eau de la fontaine, suivant que l'on tourne ou que l'on détourne la virole à laquelle ils sont adaptés ; aussitôt que la communication est établie, l'eau coule par les ajutages, tombe sur le premier fond, et s'accumule au dessus de l'ouverture $v$; cette ouverture laissant passer moins d'eau que n'en donnent les ajutages, le niveau monte de plus en plus, l'échancrure $e$ est baignée, la communication de l'air est interceptée, la pression diminue dans le réservoir, et bientôt après, l'écoulement cesse faute d'une pression suffisante. Pendant cette intermittence, l'ouverture $v$ laisse passer l'eau du premier fond sur le second, l'échancrure se dégage, la pression de l'air se rétablit, et l'écoulement recommence, pour cesser après un instant, pour recommencer de nouveau, et ainsi de suite. La durée des intermittences dépend des grandeurs relatives de l'ouverture $v$ et des ajutages, de la hauteur de l'échancrure, et de la distance des ajutages au niveau de l'eau du réservoir.

En Allemagne, en Angleterre, en Italie, et dans plusieurs provinces de la France, surtout en Languedoc, et près de Pontarlier en Franche-Comté, on trouve des fontaines naturelles qui ont des intermittences comme la fontaine précédente ; mais si le résultat est le même, le principe est très-différent.

123. *Fontaine de Héron.* Cet appareil (*Fig.* 153) se compose de trois vases, un vase supérieur L, un vase moyen M, et un vase inférieur I; et de trois tubes, le premier *si* descendant du fond du vase supérieur au fond du vase inférieur, le second *im* s'élevant du sommet du vase inférieur au dessus du vase moyen, et le troisième *ms* s'élevant du fond du vase moyen jusqu'à 2 ou 3 décimètres au dessus du vase supérieur; c'est celui-ci qui forme le jet de la fontaine de Héron. On met de l'eau dans le vase M, au moyen du bouchon B que l'on ferme ensuite; on met pareillement de

l'eau dans le vase S, on ouvre le robinet $r$, et le liquide s'élance jusqu'à un point, qui est théoriquement autant élevé au dessus du niveau du vase moyen, que le niveau du vase supérieur est lui-même élevé au dessus du niveau du vase inférieur. Cette pression est en effet celle que supporte l'air qui est enfermé dans le vase inférieur et dans le vase moyen.

La Figure 154 représente une autre fontaine de Héron, dont on on devinera facilement la disposition; il suffit de quelques tubes de verre pour la construire.

C'est avec un appareil construit sur ces principes que l'on fait l'épuisement de l'eau dans les mines de Schemnitz en Hongrie.

MM. Girard avaient imaginé des *lampes hydrostatiques* dans lesquelles l'huile était portée à la mèche par une force ascensionnelle constante, au moyen d'une modification de la fontaine de Héron. Mais les mouvemens d'horlogerie l'emportent, pour cet objet, sur toutes les combinaisons hydrostatiques que l'on a tentées jusqu'à présent.

123. *Lampe de Volta.* — Cet appareil est représenté dans la Figure 155, avec les heureux perfectionnemens que l'on doit à M. Gay-Lussac; il se compose d'un ballon à long col B, renversé dans un vase plus large V, dont il ne touche pas tout-à-fait le fond ; la jonction $cc'$ doit être hermétiquement fermée; un cylindre creux de zinc $zz'$ enveloppe le col du ballon; l'eau aiguisée d'acide sulfurique qui remplit le vase V agit sur le zinc, elle se décompose, son hydrogène se dégage, et par la pression croissante qu'il exerce, l'eau est de plus en plus refoulée dans le ballon B, jusqu'à ce que le niveau soit descendu au dessous de la dernière tranche $z'$ du zinc; alors toute action cesse, et l'on a un réservoir rempli d'hydrogène comprimé. En tournant le robinet $r$ le gaz se dégage dans l'air par le tube $t$, qui doit être très-fin; au même instant, une étincelle électrique en traverse le jet, et le courant du gaz devient un cou-

rant de flamme. Nous verrons plus tard comment se produit ce phénomène, et comment le mélange d'hydrogène et d'air est enflammé par l'électricité.

125. *Pompe aspirante et élévatoire.* — La pompe aspirante (*Fig.* 150) se compose d'un *tuyau d'aspiration* AA', d'un *corps de pompe* CC', d'un *piston* PP', *d'un tuyau d'ascension* SS', et de trois *soupapes* R, T, L, qui s'ouvrent de bas en haut. La première soupape R est au fond du corps de pompe, la deuxième T est dans l'épaisseur du piston, et la troisième L est au bas du tuyau d'ascension. Le tuyau d'aspiration plonge dans l'eau que l'on veut élever, et la tige du piston passe dans une boîte à étoupe EE' et dant une boîte à graisse GG'. A l'origine du mouvement, le piston étant soulevé, sa soupape se ferme, et les deux autres R et L s'ouvrent; première par l'air supérieur qui se comprime et s'échappe, la seconde par l'air inférieur qui se dilate et passe sous le piston; la pression diminue dans le tuyau d'aspiration, et l'eau s'y élève par l'effet de la pression extérieure. Arrivé au dessus de sa course, le piston redescend; la soupape inférieure se ferme, l'air se comprime dans le corps de pompe, soulève la soupape du piston, et passe au dessus. En remontant une seconde fois, le piston soulève l'eau un peu plus haut, et en redescendant une seconde fois il chasse une nouvelle quantité d'air. Enfin, après un certain nombre de coups, si la pompe est bien faite, l'eau arrive au dessus de la première soupape, elle monte de plus en plus, soulève elle-même la seconde soupape, et passe au dessus du piston. A partir de cet instant, tout l'air est chassé, et la pompe joue dans l'eau: chaque fois que le piston monte, il soulève toute la colonne d'eau qui est au dessus de lui, et il entraîne celle qui est au dessous; chaque fois qu'il descend, il ferme la première soupape, il ouvre la sienne, et s'en vient prendre par sa base la colonne qu'il avait entraînée, pour la soulever à son tour. L'effort qu'il faut faire pour soulever le piston se compose de deux parties;

l'une est le frottement ; l'autre est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base le piston lui-même, et pour hauteur toute la hauteur de l'orifice par lequel l'eau s'écoule dans l'air.

Pour qu'une pompe soit bonne, il faut que l'eau puisse atteindre à la première soupape R : ainsi la position de cette soupape dépend du degré de raréfaction que l'on peut donner à l'air qui est au dessus d'elle, et ce degré de raréfaction dépend lui-même de l'étendue de la course du piston et de la distance des deux soupapes T et R. Quand cette distance est nulle, le vide est possible, et, à la rigueur, la soupape R pourrait être à 32 pieds de hauteur au dessus du niveau de l'eau qu'il s'agit d'élever. Si cette distance était seulement de 1 décimètre, et que le piston n'eût que 2 décimètres de course, l'air ne pourrait être amené par le jeu de la pompe qu'à une demi-pression atmosphérique, et la soupape R ne pourrait être tout au plus qu'à 16 pieds de hauteur. Il est facile de calculer la relation générale qui existe entre ces divers élémens.

126. *Pompe aspirante et foulante, à corps de pompe alaisé.* —Elle est représentée dans la *fig.* 149. Elle se compose d'un tuyau d'aspiration A A′, d'un tuyau d'ascension S S′, d'un corps de pompe C C′ et d'un piston PP′; mais elle a seulement des soupapes R et L d'aspiration et d'ascension; rien ne passe au travers du piston ni sur son contour, et sa face supérieure est toujours en communication libre avec l'atmosphère.

Quand le piston monte, l'eau est aspirée au dessus de la soupape R, et quand il descend elle est comprimée, presse la soupape R et soulève la soupape L.

127. *Pompe aspirante et foulante sans corps de pompe alaisé.*—Cette pompe est représentée dans la figure 151. Elle diffère de la précédente par la forme et l'ajustement du corps de pompe et du piston. Les deux soupapes R et L du tuyau d'aspiration A A′ et du tuyau d'ascension S S′ sont

aussi un peu différentes; elles présentent une disposition très-heureuse, surtout pour les grandes pressions: la première R se compose de deux clapets inclinés qui viennent *butter* contre les arrêts *a* et *a'* quand ils sont soulevés par l'aspiration, et qui retombent sur le prisme *z* quand ils sont pressés de haut en bas pendant que le piston descend; la seconde L se compose d'un seul clapet incliné. L'ajustement que l'on voit au dessus est en *regard* pour visiter la soupape et la changer au besoin.

Le corps de pompe n'est point alaisé, parce que le piston ne le touche pas.

Le piston est un cylindre de métal parfaitement tourné qui passe dans la boîte à étoupes E E', et dans la boîte à graisse G G'; c'est là qu'est la véritable fermeture de la pompe.

Il est indispensable de ménager un petit conduit pour donner issue à l'air qui se dégage de l'eau et qui pourrait mettre la pompe hors de service en remplissant le corps de pompe. On peut le faire de deux manières, ou en perçant l'épaisseur du corps de pompe, ou en forant le piston dans sa longueur, et ensuite latéralement comme le représente la *figure* 150, en *ryu*, *r* est la vis de pression qui ferme l'ouverture de ce conduit.

M. Martin a établi à Marly des pompes de cette espèce, qui sont construites avec une rare perfection; elles élèvent l'eau à 500 pieds au dessus du niveau de la Seine.

128. *Pompe des Prêtres.* — Dans cette pompe le piston est remplacé par une membrane élastique (*Fig.* 142) qui est arrêtée par ses bords, et qui offre en son milieu une soupape de métal *s'*. Quand la tige *t* soulève la membrane, le liquide est aspiré, et entre par la soupape *s*; au contraire, quand la tige est abaissée, le liquide, comprimé entre les deux soupapes, soulève la soupape *s'* pour passer au dessus du piston élastique.

C'est une pompe de cette espèce qui sert à faire monter

l'huile dans les lampes de Gotten; on la dispose alors comme dans la *Figure* 143. *cc rr* représente la section verticale d'une petite caisse en cuivre qui est séparée en deux parties par la cloison *ll*; la partie de droite se subdivise sur sa longueur en trois ou quatre petits compartimens semblables à celui que représente la figure. Une peau très-fine est alternativement soulevée et déprimée au moyen du fil F; quand elle se soulève, l'huile du réservoir R entre par la soupape *s*; quand elle se déprime, l'huile est refoulée et passe par la soupape *s'* pour monter dans le tube d'ascension T. Trois compartimens ou trois pompes, ayant leurs soupapes séparées, suffisent pour la continuité du mouvement : l'une est au dessus de sa course, l'autre au milieu, la troisième à la fin, et l'huile est toujours poussée dans le tuyau d'ascension avec une force à peu près égale. C'est un mouvement d'horlogerie qui met en jeu toutes ces pompes.

129. *Presse hydraulique.* — Cette machine offre de si grands avantages dans les exploitations agricoles et industrielles qu'il nous a semblé nécessaire d'indiquer ici les détails de sa construction. Elle est représentée dans les *figures* 217, 218, 219, 220 et 221. Planche 10.

*Fig.* 221. Élévation générale de la presse.

*Fig.* 218. Coupe verticale.

*Fig.* 220. Cuir embouti.

*Fig.* 219. Pièces qui servent à ajuster le piston de la pompe.

*Fig.* 217. Détails de la soupape de pression.

Il y a deux parties distinctes dans la presse hydraulique : savoir : une pompe aspirante et foulante qui donne la pression, et un plateau à piston qui la reçoit pour la transmettre immédiatement aux corps que l'on veut presser.

La pompe est vue dans l'élévation en AF (*Fig.* 221), et beaucoup plus en grand dans la coupe verticale, en AF (*Fig.* 218).

Le plateau à piston est vu dans l'élévation en P'P (*Fig.*

221), et beaucoup plus en grand dans la coupe verticale, en P (*Fig.* 218) (ici le plateau P′ est enlevé, il ne reste que le piston).

La pompe donne la pression au piston P au moyen du tuyau *tbu*, *figures* 218 et 221.

En levant le levier L, *figure* 221, on soulève le piston S de la pompe, *figure* 218, l'eau de la bache B, *figure* 221, entre par la pomme d'arrosoir *r*, *figure* 218, soulève la soupape *i* et passe sous le piston S; quand on presse sur le levier L, on fait redescendre le piston S, l'eau est refoulée, elle ferme la soupape *i*, gagne le conduit *z*, *figure* 218, soulève la soupape D et passe dans le tuyau *tbu* pour arriver dans le corps CC′ de la presse, *figures* 218 et 221. Là elle presse fortement le piston P et le force à monter avec le plateau P′, qui presse à son tour les corps qui se trouvent entre sa surface et la plate-forme EF, *figure* 221.

Si la section du piston S est la centième partie de la section du piston P, un effort d'un kilogramme sur le premier produira, de bas en haut sur le second, une pression de 100 kilogrammes. Or, au moyen du levier L, un homme peut aisément exercer sur le piston S un effort de 300 kilogrammes; ainsi le piston peut aisément être poussé avec une puissance de 30,000 kilogrammes.

Tel est le principe fondamental de la presse hydraulique. Nous indiquerons maintenant comment on mesure les pressions et comment on est parvenu à éviter les fuites.

Les pressions se mesurent au moyen de la soupape G, *figure* 218; on en voit les détails dans la *figure* 217. Connaissant le poids *p*, sa distance *yf* au point d'appui *f*, la distance *xf* du point par lequel le levier presse sur la soupape et enfin la section de la soupape, il est facile de calculer la pression qu'elle éprouve de la part du liquide lorsque le levier *fy* est soulevé.

Pour éviter les fuites, on ajuste d'abord avec un soin particulier le piston S; les pièces qui servent à cet usage

sont vues en grand dans la *figure* 219; c'est la même disposition que dans la pompe de Marly, *figure* 151, planche 7. Mais la principale difficulté se trouvait au piston P; c'est Bramah qui l'a résolue par l'heureuse invention du cuir embouti dont on voit une coupe dans la *figure* 220. Ce cuir est disposé en *mm'*, *figure* 218, dans un espace annulaire, pratiqué à cet effet dans le corps CC' de la presse; il est facile de voir par sa forme et sa disposition qu'il ferme d'autant mieux que la pression est plus forte : car l'effet de la pression est de le pousser en même temps contre le piston P, qu'il embrasse étroitement, et contre les parois de l'espace annulaire.

La vis K sert à la *dépression*; lorsqu'on la détourne, le liquide revient du corps de la presse par le tube *ubt* et s'échappe par l'ouverture *v*.

130. *Bélier hydraulique.* — Cette machine, qui fut découverte en 1797, par Mongolfier, l'inventeur des aérostats, n'est pas moins remarquable par le principe nouveau sur lequel elle repose, que par les nombreux avantages qu'elle peut offrir. Nous essayerons d'abord de faire comprendre le principe de mécanique d'où elle tire sa force motrice. Un corps quelconque, solide ou fluide, étant animé d'une certaine vitesse, imaginons que l'on arrête quelques-unes de ses parties; à l'instant toutes les autres, qui ne sont pas directement arrêtées, vont exercer sur celles-ci des efforts différens : celles qui sont en avant tendront à les entraîner après elles ou à s'en séparer; celles qui sont en arrière, voulant aussi continuer leur route, se précipiteront en vertu de leur vitesse acquise, et se presseront les unes sur les autres en même temps qu'elles presseront les parties immobiles. Une flèche, par exemple, étant animée d'un mouvement rapide, si on l'arrêtait tout à coup par le milieu, la partie antérieure, tendant à entraîner la partie arrêtée, éprouverait une traction dans toute sa longueur, et cet effort pourrait la rompre si la vitesse était assez

grande; au contraire la partie postérieure, tendant à pousser la partie arrêtée, éprouverait une pression dans toute sa longueur, et toutes ses tranches seraient refoulées les unes sur les autres. De même, quand une colonne d'eau est en mouvement dans un tube et que tout à coup un obstacle l'arrête, elle presse cet obstacle en vertu de sa vitesse acquise; la première tranche qui le touche est bientôt arrêtée, et pressée à son tour par la tranche qui vient après, et ainsi *successivement* jusqu'à la tête de la colonne; pendant ce temps, qui est très court, le tuyau supporte un excès de pression latérale, dépendant de son diamètre et de la vitesse de l'eau, et c'est cet excès de pression résultant du mouvement arrêté qui devient la force motrice du bélier hydraulique.

TT′ (*Fig.* 222, *pl.* 10) est un tuyau dans lequel se meut l'eau d'une source avec une vitesse dépendante de la hauteur de la chute; c'est le *corps du bélier*. L'eau s'écoulerait par l'orifice V, s'il n'y avait pas d'obstacle, et gagnerait le niveau NN′, qui est le niveau naturel au dessous de la chute; mais vers cette extrémité du tuyau on ajuste diverses pièces qui forment *la tête du bélier*. S est une soupape dont la densité est double de celle de l'eau; l'eau peut la soulever par sa vitesse, et l'appliquer contre l'ouverture V qui se trouve alors exactement fermée; on l'appelle *soupape d'arrêt*. Quand la soupape S est fermée, l'eau passe par le conduit *z* et s'élève dans le vase en fonte BB′, d'où elle passe par le clapet C, dans la grande cloche en fonte HH′, d'où elle gagne enfin le tuyau d'ascension DEK. Là elle s'arrêterait lorsqu'elle serait parvenue à la hauteur du niveau supérieur de la chute, s'il n'y avait pas une force motrice capable de la pousser plus haut. Mais cette force se développe de la manière suivante : l'eau de la source, ayant acquis assez de vitesse par son écoulement naturel, soulève la soupape S et ferme l'ouverture V; alors la pression latérale résultant du mouvement arrêté exerce

un effort sur tous les points de la paroi du tuyau. Cette pression pousse le liquide en *z*, le clapet C est soulevé et l'eau passe dans la cloche HH′; la durée de cette ascension est un peu prolongée par la réaction élastique de toutes les pièces de l'appareil. Bientôt le clapet C et la soupape S retombent par leur poids, l'un, pour fermer l'ouverture du vase BB′, et l'autre pour ouvrir l'orifice d'écoulement. La série des effets rapides qui se succèdent jusqu'à cet instant, est ce que l'on nomme un *coup de bélier*. Dès que l'écoulement naturel a recommencé, la vitesse s'accélère promptement; la soupape S est de nouveau soulevée, et les mêmes phénomènes se reproduisent. On détermine par des essais la disposition des pièces, et surtout le jeu qu'il faut donner à la soupape S pour obtenir le plus grand effet possible. La limite de hauteur à laquelle on peut élever l'eau par cet appareil dépend du diamètre du tuyau et de la vitesse que l'eau peut prendre en le traversant.

On voit en *a* un piston qui sert à rendre de l'air pour remplacer celui qui est en A, dans le vase BB′, et qui se dissout peu à peu; l'air rentre de lui-même et par le jeu de l'appareil.

Il paraît que dans la pratique le bélier donne plus de 60 pour 100 de la force de la force réelle de l'eau de la source; c'est à peu près ce que peuvent donner les roues *à pots* les mieux construites; les roues *en dessous* ne donnent qu'environ 25 ou 30 pour 100.

---

# CHAPITRE IX.

## *Du mouvement des Gaz.*

131. Les gaz peuvent peuvent s'écouler comme les liquides, par des orifices en minces parois, par des ajutages ou par des tuyaux; ils peuvent s'écouler aussi sous des pressions constantes ou sous des pressions variables. Les appareils au moyen desquels on obtient des écoulemens constans se nomment des *gazomètres*.

132. *Des Gazomètres.*—Lorsqu'on recherche une grande précision, l'écoulement constant du gaz est produit par l'écoulement constant d'un liquide; rien n'est plus commode pour cet usage que le vase de Mariotte. On le dispose alors comme dans la *figure* 128; le grand col du ballon est mastiqué dans le réservoir de gaz; l'eau tombe par l'orifice $v$; s'il en arrive 20 litres en 1′, il faut que 20 litres de gaz soient chassés dans le même temps par les orifices ou par les tuyaux d'écoulement. Pour appliquer ce principe aux gaz différens de l'air, on les recueille dans de grandes vessies ou dans des ballons de baudruche que l'on enferme dans un second réservoir; l'air qui sort du premier réservoir arrive dans le second, et exerce sur ces membranes élastiques une pression constante qui produit de même un écoulement constant.

Les grands gazomètres de l'éclairage sont construits sur un autre principe : un cylindre à un seul fond est renversé sur une grande citerne remplie d'eau. Ce cylindre est en feuilles minces de métal, et a, par exemple, 10 mètres de diamètre, contient 100 mètres cubes de gaz, et pèse, je suppose, 10000 kilogrammes. Il n'enfonce pas dans l'eau,

puisqu'il est plein de gaz, seulement il presse de tout son poids sur ce gaz intérieur, et le tient à une pression plus forte que la pression atmosphérique. Dans notre hypothèse, cet excès de pression serait de 10000 kilogrammes sur une base de 10 mètres de rayon; ce qui fait à peu près une colonne d'eau de 13 centimètres. Si l'on conçoit maintenant que du fond de la citerne s'élève un tube, qui vienne d'une part s'ouvrir un peu au dessus du niveau intérieur de l'eau pour communiquer avec le gaz du gazomètre, et qui s'en aille d'une autre part se subdiviser en une foule de ramifications terminées par des becs d'éclairage, on verra qu'il suffit de tourner un robinet pour éclairer une grande ville. L'écoulement du gaz sera constant, parce que le gazomètre ne fera qu'une petite perte de poids en s'enfonçant dans l'eau de la citerne; au reste, on peut, avec des contre-poids, lui donner encore plus de régularité ou modérer sa pression. Pour remplir le gazomètre, on ferme le robinet de distribution, et l'on ouvre un autre robinet qui établit la communication entre les cornues où se forme le gaz et le tube vertical qui s'élève du fond de la citerne au dessus du niveau intérieur de l'eau.

133. *Loi de l'écoulement des gaz d'après la théorie de Daniel Bernouilli.* Daniel Bernouilli avait supposé que le théorème de Torricelli s'applique aux gaz comme aux liquides, et, en partant de ce principe, il exprimait la vitesse d'écoulement d'un gaz par la formule suivante :

$$V = \sqrt{\frac{2K(P-P')}{P}}$$

V est la vitesse d'écoulement.

P la pression intérieure.

P′ la pression extérieure.

2 K un coefficient constant égal à 155610 pour l'air à la température de la glace fondante, et dont les valeurs changent en raison inverse des densités, pour les autres gaz pris à la même température.

134. *Loi de l'écoulement des gaz d'après la théorie de M. Navier.* Tous les géomètres qui s'étaient occupés de l'écoulement des fluides élastiques avaient adopté les principes de Daniel Bernouilli; mais M. Navier vient d'établir une théorie nouvelle dans un mémoire très-remarquable imprimé dans les Mémoires de l'Académie des Sciences pour 1830. D'après M. Navier la vitesse d'écoulement est exprimée par la formule

$$V = \sqrt{2K(\text{Log } P - \text{Log } P')}$$

Les mêmes lettres désignent les mêmes choses que dans la formule précédente; mais le coefficient 2 K doit être multiplié par 2,30206 lorsqu'on veut se servir des tables de logarithmes ordinaires.

Cette formule ne s'applique qu'au cas où l'orifice d'écoulement est très-petit par rapport à la section du gazomètre.

135. Il est facile de voir que ces deux formules donnent à très-peu près les mêmes résultats lorsque la pression P ne surpasse que très-peu la pression P', et qu'elles donnent des résultats bien différens quand les pressions intérieures et extérieures présentent une grande différence.

136. Les vitesses données par les formules précédentes sont les *vitesses théoriques*, et pour vérifier la théorie il est nécessaire de les comparer aux *vitesses effectives*; celles-ci se déterminent par l'expérience, comme pour les liquides, en observant le volume de gaz qui sort dans un temps donné. Les expériences les plus précises qui aient été faites sur ce sujet sont dues à M. Lagerjhelm (Mém. de l'Acad. de Stockolm, 1822) et à M. D'Aubuisson (Ann. des Mines, 1826). Les vitesses effectives trouvées par ces habiles observateurs sont moindres que la vitesse théorique donnée par la formule de M. Navier : on en conclut que la *veine gazeuse* éprouve *une contraction* comme la *veine liquide*; et en cherchant quelle grandeur il faudrait donner à la *section contractée* pour que la théorie représentât tous les résultats de

l'expérience, on trouve que cette section devrait être égale à celle de l'orifice multipliée par 0,61 ou 0,62. Ainsi, il y a dans les gaz contraction de la veine fluide, et cette contraction est sensiblement la même que dans les liquides.

137. Quand les gaz s'écoulent du gazomètre par des ajutages coniques ou cylindriques dont la longueur est tout au plus 7 ou 8 fois le diamètre, on trouve que la dépense est plus grande que par les orifices en minces parois, comme pour les liquides; mais jusqu'à présent il n'y a pas un assez grand nombre d'expériences pour faire dans ce cas une comparaison exacte entre la dépense effective et la dépense théorique.

138. *De l'écoulement des gaz dans les tuyaux.*—M. Girard a tiré les conséquences suivantes, d'une série d'expériences qu'il a faites avec M. Cagniard-Latour sur l'écoulement de l'air et de l'hydrogène carboné :

« 1°. Que le gaz hydrogène carboné et l'air atmosphérique amenés au même état de compression, se meuvent suivant les mêmes lois et éprouvent exactement la même résistance dans les mêmes tuyaux, et cela indépendamment de leurs densités spécifiques.

» 2°. Que les résistances qu'éprouvent les fluides aériformes à se mouvoir dans les tuyaux de conduite sont exactement proportionnelles aux carrés de leurs vitesses moyennes.

» 3°. Enfin que, en conséquence de cette loi et de celle du mouvement linéaire, les dépenses du gaz par une conduite donnée de grosseur uniforme, sont toujours en raison directe de la pression indiquée dans le réservoir qui alimente l'écoulement, et en raison inverse de la racine carrée de la longueur de la conduite par laquelle il s'opère. »

Les expériences pour chaque gaz ont été faites dans deux conduites : la première avait $0^m,081$ de diamètre, et les longueurs ont été successivement $129^m$, $376^m$, et $623^m$ ; la deuxième avait 0,016 de diamètre, et les longueurs ont été successivement $37^m$, $56^m$, $85^m$, $109^m$, 126. La pression,

dans toutes les expériences, a été de $0^m,034$ d'eau. Un orifice en mince paroi de même diamètre que la petite conduite donnait une dépense onze fois plus grande qu'une longueur de 126 mètres de cette conduite; ce rapport a été le même pour l'air et pour l'hydrogène carboné.

139. Les coudes, les renflemens, les inégalités quelconques dans les tuyaux de conduite produisent toujours dans les gaz comme dans les liquides, une diminution dans la vitesse d'écoulement.

140. *De l'écoulement des gaz par les tubes très-fins.* — Il résulte de quelques essais de M. Faraday, sur l'écoulement des gaz par des tubes très-fins, qu'il se produit alors des phénomènes singuliers dépendant de la pression et de la nature des gaz; les gaz les plus légers, qui, sous de fortes pressions, s'écoulent le plus vite, paraissent au contraire s'écouler le plus lentement sous de moindres pressions. Des recherches plus précises sur ce sujet seraient d'une grande importance.

141. *Des pressions latérales des gaz pendant l'écoulement.* — Il se produit, dans les grandes souffleries des forges, un phénomène remarquable qui n'a pas échappé à la sagacité de MM. Boigues, propriétaires des forges de Fourchambault, et dont MM. Thénard et Clément ont été témoins au mois de septembre de l'année dernière. Une ouverture de 1 à 2 pouces de diamètre étant faite dans la paroi *plane* d'un réservoir d'air comprimé, l'air s'échappe avec une grand violence; mais si on en approche un disque de bois ou de métal de 7 ou 8 pouces de diamètre, et qu'après avoir vaincu la première résistance on l'applique sur l'ouverture, il n'est plus repoussé comme auparavant; il oscille vivement, en s'éloignant ou en se rapprochant de l'ouverture dans des limites très-rapprochées; l'air continue ee s'échapper avec grand bruit, entre la surface du disque et celle de la paroi; et si alors on voulait retirer le disque, il faudrait un grand effort : quoique séparé de la paroi, il semble collé contre elle. M. Clément donne de ce phénomène une explication

qui semble tout-à-fait conforme aux principes du mouvement des fluides. La veine qui sort de l'ouverture doit s'épanouir en lame très-mince pour passer entre le disque et la paroi (*Fig.* 131); son épaisseur restant la même, elle doit s'élargir à mesure qu'elle approche de la circonférence du disque; ainsi elle se trouve dans le même cas que la veine fluide qui doit remplir un cône dont les sections deviennent toujours croissantes; de là une espèce de succion toute pareille aussi à celle que l'on observe dans les ajutages coniques. C'est donc la pression atmosphérique qui agit, de dehors en dedans; sur la surface du disque, avec une portion plus ou moins grande de son énergie, suivant que la pression latérale est plus ou moins réduite; et comme cette pression latérale est très-différente aux différentes distances de l'ouverture, il est nécessaire qu'aux points où elle est le plus faible, elle se trouve beaucoup moindre que la pression atmosphérique. Il paraît que la différence qui existe entre la pression atmosphérique et la somme des pressions latérales est elle-même dépendante de l'épaisseur de la lame d'air qui s'écoule, et qu'elle devient plus grande quand cette lame devient un peu plus épaisse; de là les oscillations du disque et l'effort qui est nécessaire pour le détacher. Les conditions de ce phénomène de succion peuvent être, pour les gaz, très-différentes de ce qu'elles sont pour les liquides, à cause de la différence totale des affinités moléculaires.

Ce fait n'a pas seulement un grande importance théorique, mais il éveille l'attention sur un véritable danger que peuvent offrir les soupapes de sûreté des machines à vapeur : on voit en effet que, sous certaines conditions, la lame mince de vapeur qui s'échappe, au lieu de repousser au loin la soupape pour s'ouvrir une large issue, pourrait se transformer en une force attractive d'autant plus capable de la retenir que le danger serait plus grand.

FIN DU LIVRE PREMIER.

# LIVRE DEUXIÈME.

## DE LA CHALEUR.

### NOTIONS GÉNÉRALES.

142. L'Air, l'eau et les divers corps de la nature peuvent exciter en nous des sensations particulières, que l'on appelle sensations de *chaleur* ou de *froid*. Ces affections se produisent au contact immédiat ou à de grandes distances, et elles sont d'une telle nature que nous ne pouvons en attribuer la cause à la substance propre des corps. En présence d'un foyer allumé, nous jugeons facilement que ce n'est pas la matière du charbon qui vient sous forme invisible nous toucher et nous réchauffer; et quand nous recevons les rayons solaires, nous jugeons de même que ce n'est pas la matière pondérable du soleil qui descend vers la terre, pour produire sur nos yeux l'impression de la lumière, et sur toutes les parties sensibles de notre organisation l'impression de la chaleur. Il y a donc un *agent* qui est distinct de la substance propre des corps, qui réside dans leur masse, qui se transmet à distance, qui établit une communication continuelle entre eux et nous, et qui est la *cause* des sensations de chaleur ou de froid que nous éprouvons. Cet agent a reçu différens noms: d'abord, confondant la cause avec l'effet, on l'a appelé *chaleur*; ensuite, par des notions plus justes sur son mode d'existence, on l'a nommé *fluide igné*, *matière du feu*, etc.;

enfin, à la réforme de la nomenclature chimique, Lavoisier, Bertholet, Morveau et Fourcroy l'ont appelé *calorique*. Cette dénomination a été adoptée par tous les physiciens ; et l'on a conservé le mot *chaleur* pour désigner la science qui traite des propriétés, des effets et des lois du calorique.

Cependant on ne s'en tient pas toujours à ces strictes définitions : il arrive souvent que le mot *chaleur* est employé pour désigner l'agent lui-même qui produit les phénomènes, et que le mot *calorique* est aussi employé pour désigner l'ensemble de nos connaissances sur ces phénomènes et sur leurs lois.

143. Le calorique n'agit pas seulement sur les corps organisés, mais il agit aussi sur les corps inogarniques. La glace peut fondre, l'eau peut entrer en ébullition, le fer peut rougir au feu; tous ces phénomènes, et tant d'autres de même espèce, ont nécessairement une cause, et nos sens nous avertissent que cette cause est le calorique. Il y a une telle correspondance, une telle simultaniété entre ces modifications qui surviennent dans les corps et les changemens qui surviennent dans nos sensations, que nous craignons peu de nous tromper en portant ce jugement. Ces seules indications peuvent nous servir à classer les phénomènes du calorique, et à établir d'avance l'ordre dans lequel nous devons en faire l'étude.

Nous diviserons la théorie de la chaleur en *cinq parties*. La *première* et la *deuxième partie* auront pour objet les *deux effets physiques* que le calorique produit dans les corps, savoir : 1° la *dilatation* ou les variations de volume; et 2° le *changement d'état* ou le passage de l'état solide à l'état liquide, et de l'état liquide à l'état de vapeur.

La *troisième* et la *quatrième partie* auront pour objet les propriétés du calorique lui même. Dans la *troisième partie* nous traiterons de la *propagation du calorique*, qui comprend la *conducibilité* ou la propagation au contact, et la

*calorique rayonnant* ou la propagation à distance ; et dans la *quatrième partie*, nous traiterons du *calorique spécifique*, c'est-à-dire de la mesure des quantités de calorique qui sont nécessaires pour produire des effets déterminés sur des quantités de matière connues.

La *cinquième partie* aura pour objet la *production de la chaleur et du froid*, c'est-à-dire les actions mécaniques ou chimiques que la matière peut exercer sur la chaleur, pour la dégager ou pour l'absorber.

Nous essaierons d'abord de donner une idée générale des phénomènes qui servent de base à ces divisions de la théorie générale de la chaleur.

144. Dilatation. — Nous avons vu (13) que le calorique *dilate* tous les corps ; que le volume d'un corps quelconque dépend du degré de chaleur qu'il éprouve, et que, toutes choses égales d'ailleurs, le même degré de chaleur lui donne toujours exactement le même volume. Ainsi les degrés de dilatation peuvent nous servir à mesurer les degrés de chaleur. On appelle *température* d'un corps l'état de volume auquel il se trouve par l'influence du calorique; et l'on appelle *thermomètres*, les instrumens qui servent à mesurer les températures.

La *Figure* 159 représente un *thermomètre à mercure*; la *boule* B est pleine de mercure, et ce liquide s'élève dans la *tige* T, jusqu'à une certaine hauteur H, qui dépend de la température. Lorsqu'on chauffe la boule, le mercure *augmente* de volume, le thermomètre *monte*, et l'on dit que la *température s'élève*; lorsqu'on la refrodit, le mercure *diminue* de volume, le thermomètre *descend* et la *température s'abaisse*. Toutes les fois que le thermomètre revient au même point ou au même état de volume, la température est la même. Si l'on prenait un autre thermomètre à mercure (*Fig.* 160), plus grand ou plus petit que le premier, ces deux instrumens monteraient et descendraient ensemble ; mais les ascensions et les dépressions pourraient être

très-différentes : les *réservoirs* B et C étant égaux, il suffirait, par exemple, que le tube du premier eût un diamètre dix fois moindre que le tube du second, pour que ses mouvemens eussent cent fois plus d'étendue ; quand il monterait de 100 millimètres, le second ne monterait que de 1 seul millimètre. L'un serait cent fois plus *sensible* que l'autre.

Ces thermomètres ne pourraient servir qu'à indiquer des températures *égales*, des températures *plus hautes* et des températures *plus basses*, suivant que le sommet de la colonne reviendrait à un même point fixe, ou qu'il varierait au dessus ou au dessous de ce point. De cette manière, ils pourraient déjà être de quelque avantage pour la science; mais ce qu'il y a d'essentiel dans les thermomètres, c'est leur *graduation;* car ce n'est qu'en les graduant, que l'on peut parvenir à exprimer les températures par des nombres, à les comparer entre elles, et à en déduire les lois du calorique.

Les principes de la *graduation* des thermomètres reposent sur ce fait : qu'il y a des phénomènes qui se produisent toujours à la même température. Ainsi, en prenant dans la paume des mains un des thermomètres précédens, on le verra monter plus ou moins, suivant que l'on aura les mains plus chaudes ou plus froides. Mais si l'on a la patience d'attendre, et de tenir les mains pressées jusqu'à ce qu'elles se soient réchauffées le plus possible, on verra le thermomètre qu'elles tiennent enfermé monter lentement jusqu'à une certaine limite, où il arrivera toujours, et qu'il ne dépassera jamais. Dans toutes les saisons, sous tous les climats et chez tous les individus il s'arrêtera au même point ou à très-peu près. Ainsi la température du corps humain est une température constante, et elle offre un *point fixe*, que l'on pourrait prendre pour point de départ dans l'évaluation numérique des températures. Cependant il y a d'autres phénomènes qui sont plus mathématiquement constans, et aux-

quels il est plus simple de recourir. Dans la *glace fondante*, un thermomètre revient toujours exactement au même point, soit que cette glace ait été formée artificiellement, soit qu'elle ait été formée naturellement au dessus des montagnes, sur les rivières ou sur les mers : pourvu qu'elle soit composée d'eau bien pure, son *point de fusion* est un point parfaitement fixe. Il en est de même pour les différens points auxquels les corps *fusibles*, comme la cire, le plomb, etc., passent de l'état solide à l'état liquide; chacun d'eux entre en fusion à une température qui est toujours la même. Ce fait fondamental paraît avoir été observé pour la première fois par Amontons (*Ac. des Sciences*, 1703).

*L'ébullition de l'eau* présente un phénomène analogue : une fois que la chaleur est arrivée au point où l'eau bout avec force, en poussant le feu plus vivement on arrive à la faire bouillir plus vite, mais non pas à la chauffer davantage; le thermomètre reste au même point parfaitement immobile. Sous la *même pression* barométrique, dans tous les lieux de la terre, l'eau pure en ébullition donnera le même point fixe. Il en est de même de tous les corps au moment où ils passent de *l'état liquide à l'état de vapeur* par l'ébullition; chacun d'eux a son point particulier, qui est fixe sous la même pression.

Concevons maintenant que l'on prenne *deux points fixes*, celui de la *glace fondante*, par exemple, et celui de l'*eau bouillante*, et que, les ayant marqués l'un et l'autre sur le tube ou sur la tige du thermomètre, on divise l'intervalle en 100 parties égales, et que l'on continue les division ou *degrés* au dessus et au dessous des points extrêmes, on aura un *thermomètre gradué*, qui s'appelle *thermomètre centésimal*, et qui s'appellerait *thermomètre de Réaumur*, si l'on avait divisé l'intervalle en 80 parties seulement. Le point de la glace fondante est le *zéro* de la division, et les degrés qui sont *au dessous* se distinguent par le signe *moins*; — 10° ou — 20° signifient *moins dix* ou *moins vingt degrés*.

145. Changement d'état. — 1 kilogramme de glace à la température de *zéro*, et un kilogramme d'eau à la température de 75°, donnent, après leur mélange et après la fusion complète de la glace, deux kilogrammes d'eau à la température 0. Ainsi la glace a été fondue, mais elle n'a pas changé de température; l'eau chaude à 75° est restée liquide, mais elle s'est refroidie jusqu'à la température de la glace. Donc le kilogramme de glace, *pour se fondre*, a *absorbé* tout le calorique qu'a perdu le kilogramme d'eau, en descendant depuis 75° jusqu'à 0; il l'a absorbé pour se fondre, puisque sa température n'a pas changé. Le calorique absorbé et comme dissimulé dans la masse liquide qui résulte de la fusion s'appelle *calorique latent* ou *calorique de fusion*. L'eau en se congelant reproduit et dégage de nouveau, pendant sa *solidification*, tout le calorique qu'elle avait absorbé pendant sa fusion; c'est-à-dire qu'un kilogramme de glace à 0 et un kilogramme d'eau à 0 n'ont pas la même quantité de chaleur, quoique étant à la même température; l'eau en a plus que la glace, et ce qu'elle en dégage pendant qu'elle se congèle, serait capable d'élever un autre kilogramme d'eau de 0 à 75°.

Le même phénomène se produit dans le passage de l'état liquide à l'état de vapeur. Au moment de sa formation la vapeur se trouve à la même température que le liquide qui lui donne naissance, mais à poids égal elle a beaucoup plus de calorique; car elle en absorbe, à mesure qu'elle se forme, bien plus encore que la glace n'en absorbe à mesure qu'elle se fond. Ce calorique absorbé et dissimulé dans la masse gazeuse de la vapeur s'appelle encore *calorique latent*, et quelquefois *calorique de vaporisation* ou *calorique d'élasticité*. Quand la vapeur revient à l'état liquide, elle reproduit et dégage de nouveau, pendant sa *condensation*, toute cette quantité de calorique qu'elle avait dû prendre pendant sa formation.

Ces absorptions de calorique en proportions différentes,

pendant la fusion et la vaporsiation, et ces reproductions égales, pendant la solidification et la condensation, se manifestent nécessairement dans tous les corps. *Le phénomène de la chaleur latente est la condition essentielle des changemens d'état.*

146. Propagation du calorique. — Le calorique se propage dans les corps et il se propage à distance.

Dans les corps il se répand de proche en proche, jusqu'aux molécules les plus intérieures de leur substance. Au feu de forge, par exemple, les pièces de fer sont d'abord échauffées à leur surface, puis le calorique gagne peu à peu, et pénètre enfin toute l'étendue de la masse qui est enveloppée de feu. Cette propagation intérieure du calorique est ce que l'on appelle la *conducibilité* ou la *conductibilité;* elle est plus ou moins rapide, suivant la nature des corps. On nomme *bons conducteurs* ceux qui se laissent pénétrer facilement par la chaleur, et qui prennent rapidement la température qu'ils doivent avoir; et *mauvais conducteurs* ceux qui se laissent pénétrer moins facilement, et qui sont plus lents à se mettre en équilibre de température dans toutes leurs parties. Les métaux sont en général de bons conducteurs.

Le verre, le soufre, le charbon, les pierres de différentes espèces, toutes les substances végétales et animales, sont en général de mauvais conducteurs; les liquides et les gaz sont les plus mauvais conducteurs que l'on connaisse.

A distance, le calorique se propage à peu près comme la lumière : il traverse le vide avec une grande vitesse, comme la lumière traverse les espaces célestes; il passe dans certains corps, sans s'y arrêter et sans les rendre chauds, à peu près comme la lumière passe dans le verre, sans s'y éteindre et sans le rendre lumineux. Ce mode de propagation est ce que l'on appelle le *rayonnement du calorique;* c'est par rayonnement que le calorique du soleil arrive à la terre; c'est aussi par rayonnement qu'un foyer nous échauffe à travers les couches d'air qui nous séparent de lui, et

qu'un corps très-peu chaud nous fait sentir sa présence, même à une assez grande distance. Le *calorique rayonnant* devient du calorique ordinaire, lorsqu'il est absorbé par les corps et qu'il se répand par la conducibilité dans les différentes parties de leur masse; et réciproquement, le calorique qui s'échappe des corps, à mesure qu'ils se refroidissent, s'échappe sous la forme de calorique rayonnant, à moins qu'il ne rencontre immédiatement des corps qui l'absorbent et dans lesquels il ne puisse passer que de molécule à molécule.

147. Calorique spécifique.—Les diverses températures des corps expriment les variations de leurs volumes, mais elles n'expriment pas les *quantités de calorique* qu'ils reçoivent ou qu'ils perdent pour éprouver ces variations. Par exemple, quand le thermomètre à mercure s'élève de 1°, le mercure prend la centième partie de l'accroissement de volume qu'il est susceptible de prendre, depuis la température de la glace fondante jusqu'à celle de l'ébullition de l'eau; mais nous ne pouvons pas savoir d'avance s'il prend en même temps la centième partie de calorique qui lui est est nécessaire pour passer de l'une à l'autre de ces températures. A plus forte raison, des corps différens, ayant le même poids et la même température, peuvent exiger des quantités de chaleur très-différentes, pour s'élever l'un et l'autre à une température plus haute de 1°; et, en effet, 1 kilogramme de mercure, par exemple, exige beaucoup moins de chaleur que 1 kilogramme d'eau, pour passer de 0 à 1°, ou 1° à 2°, ou de 99° à 100°. A poids égal et à température égale, un corps est dit avoir plus de *capacité pour la chaleur* qu'un autre corps, lorsqu'il exige une plus grande quantité de chaleur pour éprouver les mêmes variations de température; s'il en exige le double, sa capacité est double; s'il en exige le triple, sa capacité est triple, etc.; ainsi la capacité de l'eau est à peu près 30 fois plus grande que celle du mercure, puisque, à poids égal et à température égale, l'eau reçoit 30 fois plus de chaleur

que le mercure quand elle s'élève de 1°, et qu'elle en perd 30 fois plus quand elle s'abaisse de 1°.

148. Production de la chaleur et du froid. — Le calorique peut être accumulé dans les corps, mais il ne peut pas y être retenu et enfermé, comme l'air, l'eau et les autres fluides pondérables sont enfermés dans les vases; aucune substance n'est impénétrable au calorique : c'est un fluide *incoercible* qui est sans cesse en mouvement pour se communiquer de proche en proche dans les corps contigus, ou pour se répandre dans l'espace sous forme rayonnante. Si un corps chaud, tel qu'un boulet, par exemple, était enfoncé à 10 pieds sous terre, tout le monde sait que sa chaleur se communiquerait aux couches environnantes, puis de celles-ci aux suivantes, et ainsi de proche en proche jusqu'à de très-grandes distances; après un temps assez long, ce boulet serait refroidi, mais aucune portion de sa chaleur ne serait perdue; elle serait répandue dans les corps voisins, et l'on pourrait à la rigueur la retrouver et la recueillir en totalité. Lorsqu'un corps se refroidit dans l'air, le phénomène est différent : une portion de sa chaleur passe aux molécules d'air qui le touchent, mais une portion s'échappe sous forme rayonnante, à peu près comme la lumière s'échappe de la flamme; et ces rayons de calorique se répandant de toutes parts, les uns vont tomber sur des corps qui les arrêtent et les absorbent en partie, les autres s'élèvent vers le zénith, traversent toute l'épaisseur de l'atmosphère et vont se *perdre* dans le vide du ciel. Il y en a sans doute qui vont tomber sur le soleil et sur les corps célestes, comme il arrive aussi à la lumière d'une bougie de se répandre jusqu'aux astres. Ce qui est vrai d'un corps suspendu dans l'air est vrai pareillement du globe entier de la terre, suspendu au milieu de l'espace. Ainsi la terre se refroidit : à chaque instant l'atmosphère et tous les corps terrestres qui sont exposés à l'aspect du ciel perdent de leur calorique par le rayonnement. Il faut donc qu'il y ait des sources

de chaleur qui réparent à chaque instant les pertes que fait la terre, et qui puissent maintenir sur sa surface cette température moyenne dont l'intensité est une condition nécessaire des phénomènes de la végétation et des fonctions de la vie.

Nous verrons qu'il y a trois sources de chaleur pour compenser le refroidissement que la terre éprouve; et pour maintenir d'une manière à peu près permanente l'équilibre des températures terrestres. La première est une chaleur primitive qui règne encore à de grandes profondeurs, et qui se dissipe peu à peu; elle entretient les parties centrales de la terre à une chaleur sans doute plus grande que celle du fer fondu, mais elle ne contribue que dans une faible proportion aux températures de la surface.

La seconde est la chaleur solaire, dont nous donnerons la mesure dans les Élémens de Météorologie : nous verrons que tout le calorique que le soleil répand sur la terre dans le cours d'une année est capable de fondre une certaine quantité de glace que nous sommes parvenus à déterminer par des moyens simples et rigoureux.

La troisième source de chaleur est celle qui résulte des actions mécaniques et chimiques qui s'exercent sur la matière. Le simple contact des corps dégage de la chaleur; la compression, le frottement, la percussion, et tous les changemens mécaniques que peuvent éprouver les molécules matérielles dégagent pareillement de la chaleur ou du froid. Enfin les combinaisons chimiques, soit les combinaisons naturelles qui accompagnent la naissance, le développement et la décomposition des êtres, soit les combinaisons accidentelles, qui sont des produits de l'art, sont autant de phénomènes de production de chaleur ou de froid, dont il importe de connaître les lois.

---

# PREMIÈRE PARTIE.

## *Dilatation.*

## CHAPITRE PREMIER.

### *Construction du Thermomètre à mercure.*

149. La construction du thermomètre à mercure se réduit à un petit nombre d'opérations qui sont faciles à exécuter. Il faut préparer le tube, introduire le liquide, fermer le thermomètre et le graduer.

150. Les tubes de thermomètre doivent avoir un diamètre intérieur qui soit partout le même, afin que des longueurs égales correspondent à des volumes égaux. Pour s'assurer de cette condition, on fait passer, dans l'intérieur du tube que l'on veut employer, une petite colonne de mercure de 1 ou 2 centimètres de longueur; ensuite, par une inclinaison convenable, ou par une légère pression que l'on peut exercer avec une vessie de gomme élastique, on fait courir cette colonne d'un côté ou de l'autre, jusqu'à ce qu'elle ait parcouru toute l'étendue du tube (*Fig.* 168). Si, dans chaque position, elle occupe la même longueur, on est très-sûr que le tube est partout d'un diamètre égal; et, pour l'employer à la construction d'un thermomètre, il ne reste plus qu'à y souffler une boule (*Fig.* 159), ou à y souder un réservoir cylindrique (*Fig.* 160).

Lorsqu'on veut employer un tube inégal, il faut le *cali-*

*brer*, c'est-à-dire marquer sur toute sa longueur des intervalles successifs qui correspondent à des volumes égaux. Cette opération est délicate; mais, au moyen de la disposition qui est représentée *Figure* 168, on parvient à la faire avec une grande exactitude.

151. Pour introduire le liquide, on chauffe la boule afin d'en dilater l'air, et ensuite on plonge rapidement l'extrémité du tube dans un bain de mercure. Le refroidissement qui a lieu diminue l'élasticité de l'air intérieur, et la pression atmosphérique force le liquide à monter de plus en plus; il suffit qu'il en arrive seulement quelques gouttes dans le réservoir (*Fig.* 161). Alors, retournant l'appareil pour chauffer de nouveau la boule, on la chauffe jusqu'à faire bouillir le liquide qu'elle contient; les vapeurs de mercure remplissent bientôt toute la capacité de la boule et du tube; l'air est complètement chassé, et cette fois, en plongeant très-vite l'extrémité du tube dans le bain de mercure (*Fig.* 162), on est presque assuré qu'il ne restera pas la moindre trace d'air ni de vapeur d'eau dans tout l'intérieur de l'appareil. Cependant, si l'on apercevait encore, soit dans le réservoir, soit dans la longueur du tube, la plus légère bulle d'air, il faudrait recommencer l'ébullition et le retournement.

152. Avant de fermer le thermomètre, on en *règle la course*, c'est-à-dire que l'on fait sortir ou rentrer du liquide jusqu'à ce que le sommet de la colonne corresponde à peu près à la hauteur que l'on veut choisir pour la température moyenne; ensuite on ferme à la lampe l'extrémité du tube. Cette opération se fait de deux manières : 1°. en faisant le vide au dessus de la colonne thermométrique; 2°. en y laissant de l'air. Dans le premier cas, on commence par effiler l'extrémité du tube, et, après cela, on chauffe la boule sur des charbons jusqu'au point de faire sortir une petite goutte de liquide. A cet instant même, on dirige le dard du chalumeau (*Fig.* 163) sur l'extrémité du bec effilé du tube;

le verre se fond et le tube est fermé; il ne reste plus qu'à l'arrondir en le présentant au dard de la lampe après que la colonne s'est retirée par le refroidissement.

Dans le second cas, le thermomètre étant à la température *ambiante*, c'est-à-dire à la température de l'air environnant, on présente l'extrémité du tube au dard de la lampe, et on la ferme hermétiquement; ensuite on la maintient rouge et à peu près en état de liquéfaction pendant quelques instans, et alors, chauffant rapidement la boule, soit avec la main, soit avec une lampe, la colonne monte, l'air est repoussé, et par la pression qu'il exerce au sommet du tube sur le verre fondu, il forme une espèce de réservoir qui est plus ou moins grand, suivant que l'air y est refoulé avec plus ou moins de force (*Fig.* 166 et 167). Ce réservoir supérieur est toujours nécessaire lorsqu'on laisse de l'air quand le tube thermométrique est très-fin : sans pression supérieure, la colonne se divise à chaque instant.

153. La *graduation* du thermomètre consiste à marquer les *deux points fixes*, et à diviser en parties égales l'intervalle qui les sépare. Les points fixes qui sont généralement adoptés sont celui de la glace fondante et celui de l'eau bouillante. Pour marquer le point de la glace fondante, on plonge dans un vase rempli de glace pilée (*Fig.* 164) la boule du thermomètre et toute la partie de la tige dans laquelle il se trouve du liquide. La température ambiante étant plus haute que o, la glace fond peu à peu, et toute la masse se maintient à la température fixe de la glace fondante. Après quelques instans, le thermomètre a pris cette température; il reste parfaitement stationnaire, et l'on marque le point précis où il se trouve; on le marque sur le tube d'abord à l'encre, et ensuite on y fait un trait au diamant : c'est le o ou le point de départ de notre *échelle thermométrique*.

Pour marquer le point de l'ébullition, on prend un vase à long col (*Fig.* 165), dans lequel on fait bouillir de *l'eau*

*distillée*; après quelques instans d'ébullition, la vapeur en a échauffé également toutes les parties, et elle s'échappe par les ouvertures latérales; alors le thermomètre est enveloppé de toutes parts d'un bain de vapeur, dont la température est partout la même et partout égale à la température de la première couche d'eau bouillante. Bientôt la colonne arrive à un point fixe, qu'elle ne peut plus dépasser; c'est le point d'ébullition; on le marque d'abord à l'encre et ensuite au diamant. Si, au moment de l'expérience, la hauteur du baromètre était sensiblement différente de 760$^{mm}$, il faudrait faire une correction, dont nous donnerons la valeur en parlant de l'ébullition.

L'intervalle des deux points de la glace fondante et de l'eau bouillante est divisé en 100 degrés ou en 100 parties égales; les divisions sont continuées au dessus et au dessous de ces points, et leur ensemble forme l'*échelle thermométrique*. Quand les divisions sont marquées au diamant sur le tube lui-même, on dit que le tube porte son échelle; mais le plus souvent les divisions sont marqués sur une monture en bois, en ivoire, en verre ou en métal; il faut alors fixer le thermomètre sur sa monture, de manière que les points de la glace et de l'eau bouillante qui sont marqués sur la tige correspondent très-exactement et d'une manière permanente aux points 0 et 100 qui sont marqués sur l'échelle divisée de la monture.

154. Tous les thermomètres à mercure, construits d'après ces principes, sont des instrumens *comparables*, c'est-à dire qu'ils marchent ensemble, et indiquent en même temps le même nombre de degrés. En effet, deux volumes d'un même corps étant pris à 0, si on les porte à une autre température, de telle sorte que l'un d'eux se dilate, par exemple, de la millième partie de son volume à 0, l'autre se dilatera aussi de la millième partie de son volume à 0; par conséquent deux thermomètres à mercure doivent marquer en même temps 1°, 2°, 3°, etc., parce qu'ils doi-

vent prendre en même temps le centième, les 2 centièmes, les 3 centièmes, etc., de l'accroissement de volume qu'ils sont susceptibles de prendre en passant de 0 à 100°.

Cependant ce raisonnement n'est vrai qu'en supposant le mercure contenu dans des vases ou dans des enveloppes solides de même nature; car, dans les thermomètres, ce n'est pas la *dilatation absolue* du mercure que l'on observe, mais sa *dilatation apparente*, c'est-à-dire la différence qui existe entre l'accroissement de volume du mercure et l'accroissement de capacité de l'enveloppe qui le contient. Si le verre se dilatait autant que le mercure, le thermomètre resterait stationnaire à toutes les températures; et même si l'enveloppe du verre se dilatait plus que le liquide qu'elle contient, les augmentations de chaleur feraient baisser le thermomètre, au lieu de le faire monter. Pour que les thermomètres soient rigoureusement comparables, il faut donc que leurs enveloppes soient également dilatables.

155. On peut construire des thermomètres à mercure qui marquent jusqu'à 3 ou 4 cents degrés, mais il est impossible de les faire aller plus loin, soit parce que à ces hautes températures le verre offre moins de résistance, soit aussi parce que le mercure donne alors des vapeurs abondantes qui vont se condenser dans les parties froides, ou qui pressent le tube au point de le briser. Au dessous de 0, le thermomètre à mercure ne donne des indications justes que jusqu'à — 30 ou — 35°; car il approche alors de son point de congélation, qui est vers — 40, et au changement d'état, tous les corps éprouvent des modifications très-brusques.

156. Pour les recherches, et même pour les observations auxquelles on veut donner quelque exactitude, il convient d'employer des thermomètres qui n'aient que 15 ou 20 degrés de course : l'un marquant, par exemple, les températures depuis + 10 à — 5, un autre de — 5 à — 20,

un autre de + 10 à + 25, etc.; alors les réservoirs ne contiennent que très-peu de mercure, les tubes sont d'un diamètre intérieur excessivement fin, et chaque degré occupe une grande longueur. Ces thermomètres ont le double avantage de prendre rapidement la température, et de l'indiquer avec une grande précision. Pour les graduer, il est nécessaire d'avoir un *thermomètre étalon*, c'est-à-dire un thermomètre gradué à la glace fondante et à l'eau bouillante, et de l'exactitude duquel on soit parfaitement assuré.

M. Bellani a observé que le 0 des thermomètres à mercure s'élève avec le temps, comme si la boule devenait plus petite. Déjà, en 1817, MM. Gay-Lussac et Arago avaient remarqué que le 0 du thermomètre des caves de l'Observatoire s'était élevé de 0,38. M. Pictet, M. Flaugergues et plusieurs autres physiciens ont reconnu la vérité de cette observation importante. Quelquefois la variation s'élève jusqu'à plus de deux degrés. On ne sait pas encore d'une manière certaine si ce phénomène dépend d'une portion d'air qui se dissoudrait dans le mercure pour en augmenter le volume, ou s'il dépend de la pression atmosphérique, qui pourrait, à la longue, en comprimant le verre de la boule, lui donner une moindre capacité. S'il reste quelque doute sur la vraie cause du fait, il n'en reste aucun sur le fait lui-même, et il importe que tous les observateurs s'astreignent à vérifier souvent les graduations de leurs thermomètres.

---

## CHAPITRE II.

### *Formules de dilatation.*

157. Nous donnerons séparément les formules de la *dilatation linéaire* et celles de la *dilatation cubique*.

La *dilatation linéaire* d'un corps est la dilatation qu'il éprouve dans sa longueur, ou, plus généralement, la dilatation qu'il éprouve dans une seule de ses dimensions.

La *dilatation cubique* est la dilatation en volume. Concevons, par exemple, un cube dont toutes les arêtes aient une longueur de 1 mètre à la température 0, et supposons qu'on le porte de 0 à une autre température quelconque : par la dilatation, chacune des arêtes va s'allonger, et le volume total va aussi augmenter; l'allongement des arêtes sera la dilatation linéaire, et l'augmentation de volume sera la dilatation cubique. Chacune des arêtes devenant, par exemple, $1+l$, le volume deviendra $(1+l)^3$ ou $1+3l+3l^2+l^3$, ou simplement $1+3l$; parce que la dilatation linéaire est toujours une si petite fraction de la longueur primitive, qu'il est permis d'en négliger le triple carré $3l^2$, et à plus forte raison le cube $l^3$. Ainsi la *dilatation cubique* est *triple* de la *dilatation linéaire*.

On dit que la dilatation est uniforme, par rapport au thermomètre à mercure, lorsqu'elle est la même pour chaque degré de ce thermomètre, de telle sorte que $l$ représentant la dilatation linéaire pour 1°, dans le cas de la dilatation uniforme, $2l$ sera la dilatation pour 2°, et $tl$ la dilatation pour $t$°; de même, $k$ étant la dilatation cubique pour 1°, $2k$ sera la dilatation pour 2°, et en général $tk$ la dilatation pour $t$°.

158. Désignons par $l$ la dilatation linéaire d'un corps,
par $L^{\circ}$ sa longueur à la température o,
par $L'$ sa longueur à la température $t^{\circ}$,
en admettant que la dilatation soit uniforme, nous aurons une relation entre ces quatre quantités, $l$, $t$, $L^{\circ}$, $L'$, au moyen de laquelle, trois de ces quantités étant données, il sera facile de trouver la quatrième.

Puisqu'un corps, dont la longueur est 1 à la température o, prend une longueur $1 + tl$ à la température $t$, il est évident que les longueurs $L^{\circ}$ et $L'$ seront entre elles comme les longueurs correspondantes de l'unité, c'est-à-dire que l'on a la proportion fondamentale

$$L^{\circ} : L' :: 1 : 1 + tl;$$

D'où il résulte,

1°. $$L' = L^{\circ}(1 + tl),$$

ce qui peut être traduit ainsi : pour avoir la longueur $L'$ d'un corps à la température $t$, il faut *multiplier* sa longueur à o par l'unité augmentée de $t$ fois la dilatation linéaire de sa substance pour 1°;

2°. $$L^{\circ} = \frac{L'}{1 + tl};$$

pour avoir la longueur $L^{\circ}$ d'un corps à la température o, il faut *diviser* la longueur qu'il a à la température $t$ par l'unité augmentée de $t$ fois la dilatation linéaire de sa substance pour 1°;

3°. $$1 + tl = \frac{L'}{L^{\circ}} \text{ ou } tl = \frac{L' - L^{\circ}}{L^{\circ}}$$

en tirant la valeur de $t$, on aura

$$t = \frac{L' - L^{\circ}}{lL^{\circ}}$$

ce qui donne la température, au moyen de la longueur à o, de la longueur dilatée et de la dilatation linéaire.

4°. En tirant la valeur de $l$, on aura

$$l = \frac{L^t - L^o}{t L^o},$$

ce qui donne la dilatation linéaire, au moyen de la longueur à o, de la longueur dilatée et de la température.

5°. $L'$ et $L''$ étant deux longueurs dilatées d'un même corps aux températures $t$ et $t'$, $1 + tl$ et $1 + t'l$ étant les deux longueurs de l'unité correspondantes aux mêmes températures, on aurait pareillement

$$L' : L'' : 1 + tl : 1 + t'l,$$

d'où

$$L'' = L' \frac{1 + t'l}{1 + tl},$$

c'est la formule rigoureuse pour avoir une longueur à la température $t'$, au moyen d'une autre longueur à la température $t$, sans passer par la longueur à o.

Quelquefois on peut employer la formule plus simple

$$L'' = L' [1 + l(t' - t)],$$

qui n'est qu'une formule d'approximation.

159. Nous aurons des formules tout-à-fait semblables pour la dilatation cubique, 1 étant le volume d'un corps à o, et $k$ la dilatation cubique de sa substance pour 1°, à 1° le volume sera $1 + k$, à 2° il sera $1 + 2k$, et en général à $t$° il sera $1 + tk$.

D'après cela, $V_o$ étant un autre volume quelconque de la même substance pris à o, et $V_t$ le volume dilaté pour la température $t$, ces deux volumes seront entre eux comme les volumes correspondans de l'unité : ce qui donne la proportion fondamentale

$$V_o : V_t :: 1 : 1 + tk;$$

d'où l'on tire, comme pour la dilatation linéaire,

1° $$v' = v_o (1 + tk),$$

ce qui donne le volume dilaté, au moyen du volume à o;

2°. $$v_o = \frac{v'}{1 + tk},$$

ce qui donne le volume à o, au moyen du volume dilaté;

3°. $$t = \frac{v_t - v_o}{k v_o},$$

ce qui donne la température, au moyen du volume à o, du volume dilaté et de la dilatation cubique;

4°. $$k = \frac{v_t - v_o}{t v_o}$$

ce qui donne la dilatation cubique, au moyen du volume à o, du volume dilaté et de la température;

5°. On a pareillement, entre deux volumes dilatés, $v_t$ et $v_t'$, et les deux volumes correspondans de l'unité pour les températures $t$ et $t'$, cette proportion

$$v_t' : v_t :: 1 + t'k : 1 + tk,$$

d'où l'on tire $$v_t' = v_t \frac{1 + t'k}{1 + tk},$$

ou par approximation $v_t' = v_t (1 + k (t' - t))$.

160. Toutes ces formules sont nécessaires pour les calculs de réduction de température; il suffira de s'exercer sur quelques exemples particuliers, pour n'avoir plus aucune difficulté à les employer.

# CHAPITRE III.

## *De la dilatation des gaz.*

161. C'EST à M. Gay-Lussac que nous devons la détermination exacte de la dilatation des gaz. Son appareil est représenté *figure* 170; il se compose d'une caisse en fer-blanc BB', qui repose sur un fourneau F'; deux ouvertures latérales et opposées V et V' sont destinées à recevoir, l'une un thermomètre à mercure *bst*, l'autre le tube à air *b'it'*; ces deux instrumens sont dans la même couche horizontale, à quelque distance au dessous du niveau *nn'* du liquide contenu dans la caisse. Le couvercle *cc'* est percé de trois ouvertures; deux donnent issue à la vapeur, et celle du milieu reçoit un thermomètre vertical, dont la boule *b''* descend au même niveau que les boules *b* et *b'*. Tout l'appareil peut être mis à la température 0, et ensuite élevé graduellement de degré en degré jusqu'à la température de l'ébullition de l'eau; ensuite, pour faire une contre-épreuve, on peut le laisser refroidir lentement, et redescendre du point d'ébullition, en passant par les mêmes degrés. Chaque température doit être maintenue fixe pendant assez long-temps pour que l'on puisse observer les thermomètres et le tube à air *b'it'*.

162. Voici maintenant les données d'où l'on peut conclure la dilatation. Le tube à air *b'it'* (*Fig.* 172) est un *tube gradué*, c'est-à-dire qu'il est divisé en parties de capacités égales, et que l'on connaît le nombre de ces parties qui sont contenues dans la boule, à une température

donnée. De $d$ en $d'$ il y aura, par exemple, 100 parties, et l'on saura qu'à la température 0, la boule et le tube jusqu'en $d$ contiennent 1000 de ces parties. Par la dilatation, chacune de ces parties va s'agrandir; mais, la dilatation étant uniforme, chacune s'agrandira de la même quantité; elles resteront égales, et le volume dilaté de la boule, jusqu'en $d$, contiendra encore dix fois le volume dilaté du tube, de $d$ en $d'$. Il suffit d'introduire dans ce tube de l'air parfaitement sec, et d'en déterminer à chaque instant le volume, la pression et la température. Pour y introduire l'air sec, on le remplit d'abord de mercure, et on l'adapte à un tube plus large (*Fig.* 171), contenant des fragmens de muriate de chaux; un fil de fer $f$, que l'on peut enfoncer ou retirer, traverse le grand tube, pénètre dans le petit, et peut même arriver jusqu'à la boule. En inclinant un peu l'appareil, le mouvement du fil fait tomber successivement des gouttes de mercure, et l'air sec du grand tube passe pour en prendre la place. On arrête l'opération, lorsqu'il ne reste plus qu'une petite colonne de mercure $i$, qui doit servir d'*index*. C'est alors que l'on dispose le tube dans la caisse de fer-blanc, comme il est représenté (*Fig.* 170.)

Le volume de l'air intérieur est donné par la position de l'index.

Sa pression est donnée par la hauteur du baromètre, que l'on observe avec soin pendant toute la durée de l'expérience.

Enfin sa température est donnée par les deux thermomètres $bt$ et $b''t''$; car on prend toutes les précautions nécessaires pour que la couche horizontale $vv'$ soit à la même température dans toute son étendue, et l'on a grand soin de retirer ou d'enfoncer les tiges des thermomètres et celle du tube à air, pour que l'on puisse apercevoir seulement dans chaque observation l'extrémité des colonnes thermométriques et celle de l'index.

Lorsque la température s'élève, le volume de l'air aug-

mente; il occupe dans le tube un plus grand nombre de divisions, et chacune de ces divisions est elle-même plus grande, à cause de la dilatation du verre. On peut donc, en faisant les corrections convenables, déterminer pour chaque degré de température le volume correspondant de l'air, et conclure sa dilatation.

M. Gay-Lussac a démontré de cette manière :

1° Que la dilatation de l'air est uniforme depuis o jusqu'à 100° ;

2° Qu'elle est pour chaque degré la 267e partie, ou les 0,00375 du volume à o ;

3° Que tous les gaz se dilatent uniformément comme l'air, et que, pour tous, le *coefficient de dilatation* reste le même; il est toujours pour chacun d'eux les 0,00375 du volume à o.

Tandis que M. Gay-Lussac, en France, découvrait ces lois remarquables, M. Dalton, à Manchester, parvenait au même but.

163. MM. Dulong et Petit ont étudié la dilatation des gaz pour des températures plus basses que o et plus hautes que 100°. Ce travail a été le point de départ de ces habiles physiciens, dans les recherches qu'ils ont faites sur la chaleur, et qui constituent les plus belles découvertes expérimentales dont la théorie de la chaleur se soit enrichie dans ces derniers temps.

Depuis o jusqu'à — 36°, la dilatation de l'air rapportée au thermomètre à mercure est encore uniforme et la même qu'entre o et 100°. Au-dessous de — 36°, le mercure est trop près de son point de congélation pour qu'on puisse l'employer à la mesure des températures.

Depuis 100° jusqu'à 360°, la dilatation de l'air devient décroissante, quand on la rapporte au thermomètre à mercure; c'est-à-dire que pour chaque degré, et par conséquent pour chaque accroissement égal de volume que prend le thermomètre, l'air prend des accroissemens de volume

qui deviennent de plus en plus petits. Réciproquement, au dessus de 100°, les dilatations du mercure sont croissantes, par rapport aux dilatations de l'air. D'après cela il semble qu'on doive être fort embarrassé de décider entre le mercure et l'air, pour savoir auquel des deux appartient l'irrégularité. Mais si l'on considère que tous les gaz se comportent exactement comme l'air, et que d'ailleurs l'état gazeux a en lui-même quelque chose de plus permanent que l'état liquide, qui n'est qu'un état passager, on comprendra facilement que c'est la dilatation de l'air qu'il faut prendre pour type, et que c'est à elle qu'il faut rapporter les dilatations de tous les corps. Nous reviendrons sur ce sujet dans le chapitre 7, en traitant de la comparaison que l'on peut faire des diverses échelles thermométriques. Mais, dès ce moment, nous allons rapporter le tableau des comparaisons qui ont été faites par MM. Dulong et Petit, de la marche relative des thermomètres à air et à mercure, depuis la température de 100° jusqu'à la température de 360°, qui est celle de l'ébullition du mercure.

| TEMPÉRATURES indiquées par le therm. à mercure, à enveloppe de verre. | TEMPÉRATURES indiquées par un therm. à air, et corrigées de la dilatation du verre. | VOLUMES correspondans d'une même masse d'air. |
|---|---|---|
| — 36° | — 36° | 0,8650 |
| 0 | 0 | 1,0000 |
| 100 | 100 | 1,3750 |
| 150 | 148,70 | 1,5576 |
| 200 | 197,05 | 1,7389 |
| 250 | 245,05 | 1,9189 |
| 300 | 292,70 | 2,0976 |
| Ebull. du merc. 360 | 350,00 | 2,3125 |

La première colonne représente les températures indiquées par le thermomètre à mercure.

La seconde colonne représente les températures correspondantes indiquées par un thermomètre à air, que l'on suppose gradué comme le thermomètre à mercure; c'est-à-dire que l'intervalle entre la glace fondante et l'eau bouillante est divisée en 100 parties égales, et que les divisions sont prolongées au dessus et au dessous de ces points. Seulement les degrés du thermomètre à mercure dépendent de la dilatation du mercure et de celle du verre qui lui sert d'enveloppe, tandis que les degrés du thermomètre à air sont corrigés de la dilatation du verre, que nous supposons connue.

La troisième colonne représente les volumes successifs que prend une même masse d'air sec, sous la même pression, en passant de la température 0°, où son volume est égal à l'unité, aux températures qui sont exprimées dans les deux autres colonnes, soit en degrés du thermomètre à mercure, soit en degrés du thermomètre à air.

On voit que le thermomètre à air et le thermomètre à mercure sont parfaitement d'accord depuis — 36° jusqu'à + 100°; mais qu'au dessus de 100, le thermomètre à mercure prend l'avance; il marque 200, quand le thermomètre à air ne marque que 197,05: ce qui fait une différence d'environ 3°; cette différence est plus que double, en passant de 200 à 300; et enfin elle est de 10°, en passant de 100 à 360°, puisque le thermomètre à air ne marque alors que 350.

164. L'appareil que MM. Dulong et Petit ont employé pour parvenir à ces résultats est représenté *Fig.* 156, 157 et 158; il se compose d'une caisse rectangulaire en cuivre rouge, de 7 décimètres de longueur, de 1 décimètre de largeur et de 1 décimètre de profondeur, que l'on remplit d'une huile fixe, et que l'on ajuste sur un fourneau propre

à en chauffer également toutes les parties. On en voit la coupe verticale dans la *Fig.* 157, et le plan ou la coupe horizontale dans la *Fig.* 158. Le couvercle est percé de plusieurs trous, les uns destinés à recevoir des thermomètres, les autres des tiges armées de volans, qui mêlent le liquide par leur rotation, et qui établissent partout l'uniformité de température. L'une des petites faces latérales est percée de deux ouvertures de même grandeur et au même niveau : la première reçoit un thermomètre horizontal *bt*, et la seconde le tube à air *cac'*, qui est aussi horizontal ; ces deux instrumens sont dans la même couche de niveau, et la boule *b* du thermomètre correspond au milieu *a* de la longueur du tube. Avec cet appareil la dilatation de l'air a été observée de deux manières, par la mesure des volumes, et par la mesure des pressions.

165. *Dilatation de l'air par la mesure des volumes.*—Pour suivre ce procédé, on termine le tube à air *cac'* par un bec très-fin *c'*, qui doit sortir de la caisse de cuivre (*Fig.* 157 et 158). Ce tube étant rempli d'air sec, on le laisse ouvert, on le dispose dans l'appareil, on verse l'huile fixe qui doit être chauffée, et l'on élève graduellement la température. Lorsqu'on approche du degré de chaleur que l'on veut atteindre, on ferme le fourneau. La température monte encore ; elle arrive à un *maximum* où elle reste stationnaire pendant quelques instans ; et c'est alors que l'on fait les trois opérations d'où dépend le succès de l'expérience : on observe le thermomètre à mercure, on oberve le baromètre, et en même temps on ferme au chalumeau le bec *c'* du tube à air. Ensuite, l'appareil étant refroidi, on enlève le tube à air, on le porte dans un appartement dont la température est connue, on le retourne verticalement, la pointe en bas, dans une cuvette à mercure, et l'on brise l'extrémité du bec ; l'air refroidi n'ayant plus qu'une tension moindre que la pression atmosphérique, le mercure monte jusqu'à une certaine hauteur, que l'on mesure avec beaucoup de

soin. Après cela on fait trois pesées : 1° on pèse le tube et tout le mercure qu'il contient ; 2° on pèse le tube sans mercure ; 3° on pèse le tube rempli de mercure ; de cette dernière pesée, retranchant successivement la première et la deuxième, on a les poids des deux volumes de mercure : le premier égal au volume d'air refroidi, le second égal au volume total du tube, et par conséquent égal au volume d'air chaud qui le remplissait au moment où il a été fermé au chalumeau. En corrigeant ces résultats de la dilatation du verre et de la différence des pressions, l'on arrive enfin au rapport exact qui se trouve entre le volume de l'air chaud et le volume de l'air froid ; d'où l'on conclut la dilatation de l'air.

166. *Dilatation de l'air par la mesure des pressions.* — Pour suivre ce second procédé, on prend le tube à air qui est représenté dans la *Figure* 156 ; ce tube s'ajuste comme le premier ; seulement sa partie recourbée descend verticalement. On chauffe comme la première fois, et lorsqu'on est arrivé au *maximum* de température, au lieu de fermer l'extrémité du tube à air, on lui présente une petite capsule de mercure, et on laisse refroidir l'appareil. La tension de l'air diminuant, le mercure monte dans la branche verticale, et l'on mesure avec beaucoup de soin la hauteur à laquelle il s'arrête quand la température du refroidissement est devenue stationnaire ; de cette manière, en faisant la correction convenable, on connaît le volume et la pression de l'air chaud, le volume et la pression de l'air froid, et l'on en déduit la dilatation.

Les résultats de ces deux procédés se confirment l'un par l'autre, car ils s'accordent parfaitement entre eux, et montrent en même temps que la loi de Mariotte s'étend à toutes les températures.

L'hydrogène, qui est de tous les gaz celui qui diffère le plus de l'air atmosphérique, par sa constitution et par la plupart de ses propriétés, a cependant donné les mêmes

résultats, soit pour l'uniformité, soit pour la quantité de sa dilatation.

167. M. de Laplace explique ces résultats et les autres propriétés essentielles des gaz dans sa belle théorie des fluides élastiques, qui forme un des derniers livres de la Mécanique céleste.

---

## CHAPITRE IV.

*De la dilatation absolue du mercure, et de la dilatation apparente de quelques autres liquides.*

168. MM. Dulong et Petit ont déterminé la dilatation absolue du mercure avec une grande précision. Leur appareil, qui est représenté *Fig.* 191, 192, 193, 194 et 195, repose sur ce principe d'hydrostatique (65), que deux colonnes liquides qui se font équilibre ont des hauteurs qui sont en raison inverse de leurs densités.

AT et A′T′, figure 195, sont deux tubes verticaux, communiquant par le tube horizontal TT′. On les remplit de mercure jusqu'à la hauteur $nn'$; l'action capillaire est nulle à cause de la grandeur des diamètres, et l'égalité des pressions s'établit parfaitement, quoique le tube TT′ soit très-étroit. Cet appareil repose sur une règle de fer FF′, qui repose elle-même sur une forte table en bois, que l'on met de niveau par le moyen des vis calantes $vv'$. Deux montans de fer $f$ et $f'$, portant des anneaux à clavette $ac$ et $a'c'$, maintiennent les tubes dans une position bien verticale. Le montant $f$ est terminé par un arc de fer, dont l'extrémité $r$ doit servir de repère.

L'une des branches est maintenue à la température o, l'autre est portée successivement à différentes températures; et tout se réduit dans ces recherches à mesurer exactement les hauteurs inégales des deux colonnes, et la température de la colonne dilatée.

169. Les hauteurs des colonnes au dessus de l'axe du tube T T′ se déterminent par un micromètre particulier,

représenté *figure* 192; il se compose d'une forte règle divisée, sur laquelle se meut une lunette. Cet appareil se dispose en M sur un pied solide en maçonnerie : la règle est verticale, la lunette horizontale; et l'on observe la course que doit prendre la lunette pour pointer successivement au repère *r* et aux sommets des deux colonnes. Connaissant, une fois pour toutes, la hauteur du repère au dessus de l'axe du tube TT', on en déduit les hauteurs du sommet de la colonne froide et du sommet de la colonne dilatée, au dessus du même axe.

170. Les températures se déterminent par la disposition qui est représentée figure 191. Un cylindre CC enveloppe le tube AT; on le remplit de glace pilée, et, au moyen de la petite fenêtre *o*, on peut pointer la lunette au sommet de la colonne. La température du montant *f* restant la même, le repère *r* reste parfaitement fixe. Un cylindre C'C' enveloppe pareillement le tube A'T'; on le remplit d'une huile fixe qui supporte plus de 300°, sans bouillir. Un fourneau, dont on a supprimé la figure dans toute la partie antérieure, sert à la chauffer à divers degrés. Deux thermomètres *t* et *t'* servent à marquer la température du bain d'huile, et par conséquent celle du mercure. Le premier *t* est un thermomètre à air, que nous avons décrit (166); le second *t'* est un thermomètre à mercure d'une espèce particulière; par la dilatation, le mercure s'échappe dans la petite capsule *s* : on le recueille, on le pèse, on compare son poids à celui du mercure qui est contenu dans le tube à la température o, et en faisant les corrections nécessaires pour la dilatation du verre, on en déduit la température, comptée sur le thermomètre à mercure. Les températures et les hauteurs des colonnes s'observent rapidement, lorsqu'on a fermé toutes les issues du fourneau, et pendant l'état *maximum*, qui dure plusieurs instans.

171. Nous avons vu (159) que la dilation cubique est donnée par la formule

$$K = \frac{V_t - V_o}{t\, V_o}.$$

Ici nous connaissons $t$, et nous n'avons besoin de connaître ni $V_o$ ni $V_t$; car les volumes sont en raison inverse des densités, et dans notre appareil les densités sont en raison inverse des hauteurs des colonnes; donc les volumes sont comme les hauteurs des colonnes, et $H_o$ désignant la hauteur de la colonne du tube AT, qui est à la température o, $H_t$ désignant la hauteur de la colonne du tube A′T′ pour la température $t$, nous aurons

$$\frac{V_t}{V_o} = \frac{H_t}{H_o}$$

d'où

$$\frac{V_t - V_o}{V_o} = \frac{H_t - H_o}{H_o}$$

et par conséquent

$$K = \frac{H_t - H_o}{t\, H_o}.$$

C'est par ce moyen que MM. Dulong et Petit sont parvenus aux résultats suivans pour la dilatation cubique du mercure.

| TEMPÉRATURES déduites de la dilatation de l'air. | DILATATIONS MOYENNES DU MERCURE, en volume | | TEMPÉRATURES indiquées par la dilatation du mercure supposée uniforme. |
|---|---|---|---|
| | en fractions ordin. | en fractions décim. | |
| 0° | 0 | 0,0 | 0 |
| 100 | $\frac{1}{5550}$ | 0,00018018 | 100 |
| 200 | $\frac{1}{5425}$ | 0,00018433 | 204,61 |
| 300 | $\frac{1}{5300}$ | 0,00018868 | 314,15 |

La première colonne contient les températures telles qu'on les déduit du thermomètre à air. La seconde colonne renferme, en fractions vulgaires, et en fractions décimales,

les dilatations moyennes absolues du mercure, entre la température o et chacune des températures indiquées dans la première colonne. Enfin la troisième colonne comprend les températures qu'on obtiendrait en supposant *uniforme* la dilatation du mercure, ou, en d'autres termes, celles qu'indiquerait un thermomètre construit avec ce liquide, en le renfermant dans un vase dont l'expansion suivrait la même loi que la sienne.

172. Nous verrons plus loin que la dilatation cubique du verre des thermomètres est à peu près uniforme, entre o et 100° comme celle du mercure, et qu'elle est de $\frac{1}{38700}$ ou 0,00002584 pour chaque degré centigrade. La dilatation du mercure entre ces limites étant de $\frac{1}{5550}$ ou 0,00018018, il en résulte que la *dilatation apparente* du mercure dans le verre est de 0,00015434 ou environ $\frac{1}{6479}$ pour chaque degré, et $\frac{1}{65}$ de o à 100°; car la dilatation apparente du mercure dans le verre n'est autre chose que la dilatation absolue de mercure diminuée de la dilatation absolue du verre.

173. La dilatation apparente de l'alcool dans le verre peut s'obtenir en observant la marche d'un thermomètre dont la boule est graduée, c'est-à-dire dont la boule a une capacité connue relativement aux divisions de la tige. Si la boule contient, par exemple, 1000 fois le volume qui correspond à la longueur de 1°, il est évident qu'un accroissement de 1° de température donne une dilatation apparente de $\frac{1}{1000}$. Il paraît, d'après les observations les plus exactes, que l'alcool très-rectifié se dilate, dans le verre, de 0,122536, depuis o à 100°: ce qui fait environ $\frac{1}{813}$ pour la dilatation moyenne correspondante à chaque degré; sur quoi il faut remarquer que la dilatation de l'alcool est loin d'être uniforme, et que cette dilatation moyenne est plus grande que la dilatation des basses températures, et plus petite que les dilatations voisines du point d'ébullition.

174. La dilatation apparente de l'eau dans le verre peut s'observer comme celle de l'alcool. On trouve qu'entre

o et 100° elle est à peu près de 0,04386. Nous verrons, en parlant de la densité des liquides, que non-seulement la dilatation de l'eau est irrégulière, mais encore qu'elle offre un phénomène curieux de contraction à quelques degrés au dessus de 0. On voit que la dilatation apparente de l'eau entre 0 et 100° est à peu près triple de celle du mercure, et que celle de l'alcool est à peu près triple de celle de l'eau.

175. M. Gay-Lussac est parti d'un autre principe pour chercher quelque loi générale de la dilatation des liquides; au lieu de compter ces dilatations à partir d'une même température, comme celle de la glace fondante, il a pris pour chacun d'eux son point d'ébullition, et il a observé les contractions qu'ils éprouvent en se refroidissant d'un même nombre de degrés.

| | |
|---|---|
| L'eau bout à | 100° |
| L'alcool à | 78°,41 |
| Le sulfure de carbone à | 46°,60 |
| L'éther sulfurique à | 35°,56 |

Ainsi, à ces températures différentes, les molécules de ces divers liquides ont des forces répulsives égales; et les lois de dilatation devant être essentiellement liées aux lois des actions moléculaires, on voit que le plus sûr moyen d'arriver à des résultats généraux est d'étudier les contractions qui correspondent à des mêmes abaissemens de température au dessous du point d'ébullition. On doit remarquer toutefois que, sous d'autres pressions, les points d'ébullition seraient différens et ne conserveraient entre eux ni les mêmes rapports ni les mêmes différences.

La table suivante contient les résultats auxquels est parvenu M. Gay-Lussac.

*Table des contractions de 5 en 5 degrés, à partir du point d'ébullition de chaque liquide.*

| TEMPÉRATURES au-dessous du point d'ébullition. | EAU. Contraction. | ALCOOL. Contraction. | SULFURE DE CARBONE. Contraction. | ÉTHER. Contraction. |
|---|---|---|---|---|
| 0° | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 3,34 | 5,55 | 6,14 | 8,15 |
| 10 | 6,61 | 11,43 | 12,01 | 16,17 |
| 15 | 10,50 | 17,51 | 17,98 | 24,16 |
| 20 | 13,15 | 24,34 | 23,80 | 31,83 |
| 25 | 16,06 | 29,15 | 29,65 | 32,14 |
| 30 | 18,85 | 34,74 | 3 ,06 | 46,42 |
| 35 | 21,52 | 40,28 | 40,48 | 52,06 |
| 40 | 24,10 | 45,68 | 45,77 | 58,77 |
| 45 | 26,50 | 50,85 | 51,08 | 65,48 |
| 50 | 28,56 | 56,02 | 56,28 | 72,01 |
| 55 | 30,60 | 61,01 | 61,14 | 78,38 |
| 60 | 32,42 | 65,96 | 66,21 | |
| 65 | 34,02 | 70,74 | | |
| 70 | 35,47 | 75,48 | | |
| 75 | 36,70 | 80,11 | | |

La première colonne indique les températures au dessous du point d'ébullition de chaque liquide, décroissant de 5 en 5°.

Les quatre colonnes suivantes contiennent les contractions apparentes que l'eau, l'alcool, le sulfure de carbonne, et l'éther éprouvent dans le verre, en s'abaissant au dessous de leurs points d'ébullition, d'un nombre de degrés marqué par la première colonne. Le volume est représenté par 1000 pour le point d'ébullition ainsi à 10° au dessous, il est de 1000—6,61 pour l'eau, de 1000—11,43 pour l'alcool, de 1000—12,01 pour le sulfure de carbonne, et de 1000—16,17 pour l'éther.

« On voit par cette table, dit M. Gay-Lussac, 1° que

l'eau se dilate beaucoup moins que l'alcool et le sulfure de carbone, et ces deux liquides beaucoup moins que l'éther; 2° que l'alcool et le sulfure de carbone se dilatent également : ce n'est que dans les 15 premiers degrés qu'il y a une petite différence entre leurs dilatations; encore pourrait-elle être attribuée en partie à la difficulté de maintenir la température constante à ces degrés élevés. Dans le reste de l'échelle qui, pour le sulfure de carbone, s'étend à 60° au dessous de son point d'ébullition, ou à 13°,4 au dessous de la glace fondante, la concordance est parfaite. Frappé de ce résultat inattendu, et ne pouvant le rapporter ni à la densité ni à la volatilité très-différente des deux liquides, j'ai voulu m'assurer s'il ne dépendrait pas de la densité de leurs vapeurs. » Et en effet M. Gay-Lussac a découvert ce résultat très-remarquable, que l'alcool et le sulfure de carbone, qui se dilatent également, produisent aussi, à volume égal, des volumes égaux en vapeur.

---

## CHAPITRE V.

### *De la dilatation des solides.*

176. On peut déterminer directement la dilatation linéaire des corps solides ou leur dilatation cubique. Le premier moyen a paru le plus simple à la plupart des observateurs; et l'on voit en effet qu'il se réduit à transformer les substances solides en barres ou en tiges plus ou moins fortes, de 1 ou 2 mètres de longueur, à porter ces barres à des températures déterminées, et à mesurer les allongemens ou les contractions qu'elles éprouvent.

Pour produire une température connue et parfaitement uniforme dans toute l'étendue d'une barre dont on cherche la dilatation, on la dispose au fond d'une cuve ou d'une espèce d'auge rectangulaire, que l'on remplit ensuite de glace fondante, pour avoir la température o, et d'une huile fixe ou d'un autre liquide, pour avoir des températures de plus en plus élevées. La barre est placée horizontalement, de peur que son poids ou des pressions inégales ne gênent ses mouvemens de dilatation, et elle repose sur des tubes de verre, comme sur des rouleaux, afin que le liquide puisse l'envelopper de toutes parts, et se renouveler autour d'elle. Tout l'appareil peut être chauffé avec des lampes à l'esprit-de-vin; mais le plus sûr est de l'établir sur un fourneau de briques qui lui conserve pendant long-temps la même température. Des volans servent à brasser et à mélanger le liquide, et des thermomètres disposés en différens points de sa longueur et à diverses profondeurs, servent à marquer la température moyenne à laquelle se fait chaque observation.

Pour observer les allongemens et les contractions de la barre, il y a surtout deux moyens qui paraissent donner le plus grand degré d'exactitude : celui de MM. Lavoisier et Laplace, et celui de Ramsden.

MM. Lavoisier et Laplace faisaient plonger verticalement jusqu'au fond de la cuve une règle de verre, appuyée dans sa partie supérieure contre de fortes traverses en fer, qui étaient elles-mêmes soutenues par des maçonneries en pierres de taille, d'une solidité parfaite. Le tranchant de cette lame de verre était un *talon fixe* contre lequel venait s'arrêter l'une des extrémités de la barre en expérience. A son autre extrémité, où devait se porter tout son allongement, elle était en contact avec un bras de levier très-court, qu'elle faisait tourner plus ou moins. Le point d'appui du levier était en dehors, conservant sa température et son immobilité ; on pouvait donc agrandir à volonté l'amplitude de la dilatation : en faisant, par exemple, le grand bras du levier, dont on observait les mouvemens, 1000 fois plus long que le petit bras qui était directement poussé; on pouvait apercevoir des dix-millièmes ou même des cent-millièmes de millimètre.

Ramsden voulait éviter les frottemens du point d'appui et la flexibilité des bras de levier; pour cela, il faisait sortir la dilatation hors de la cuve par un moyen très-ingénieux. A chaque extrémité de ses barres il ajustait une tige verticale inflexible et assez longue pour s'élever au dessus de l'appareil; deux points marqués au sommet de ces tiges, et à la même hauteur, donnaient une distance toujours égale à la longueur de la barre. Ainsi la question était réduite à mesurer à chaque instant la distance de ces deux points : ce qui peut se faire de plusieurs manières et avec une grande précision.

177. MM. Dulong et Petit ont employé d'autres moyens, qui sont moins directs en apparence, mais qui donnent sans doute, entre des mains habiles, le dernier degré d'exacti-

tude auquel on puisse atteindre. C'est ici la dilatation absolue du mercure, qui est l'élément essentiel de toutes les autres déterminations. Avec cette donnée, à laquelle on arrive, comme nous l'avons vu dans le chap. IV, MM. Dulong et Petit ont cherché d'abord la dilatation du verre et celle du fer.

Pour le verre on prend un tube de 6 décimètres de longueur; contenant environ 700 grammes de mercure; ce tube est fermé à l'une de ses extrémités, et à l'autre, il est effilé en un bec très-fin, dont la capacité peut être négligée, par rapport à la capacité totale. On le remplit de mercure sec et purgé d'air, on le dispose horizontalement dans un bain d'huile fixe, que l'on peut chauffer à volonté; l'extrémité du bec sort du bain, et une partie du mercure s'échappe par l'effet de la dilatation. Le volume $v$ du mercure, qui sort entre deux températures connues, n'est autre chose que la dilatation apparente du mercure dans le verre, ou $k-k'$; en désignant par $k$ la dilatation absolue du mercure entre ces deux températures, et par $k'$ la dilatation absolue du verre. On a donc

$$v=k-k',$$

d'où l'on déduit $\qquad k'=k-v.$

On pourrait obtenir le volume $v$ en le jaugeant à la température o, dans un tube gradué; mais il est plus exact de le déterminer par une pesée. Pour les valeur de $k$, elles se déduisent des nombres que nous avons rapportés (171). Il résulte de ces expériences, 1° que la dilatation cubique du verre est sensiblement uniforme entre 0 et 100°, et qu'elle est pour chaque degré de $\frac{1}{38700}$ du volume à 0; 2° qu'elle va croissant à mesure que la température s'élève, et que la moyenne pour chaque degré est de $\frac{1}{36300}$ entre 0 et 200°, et de $\frac{1}{32900}$ entre 0 et 300°. Des tubes de différentes fabriques ont donné le même résultat.

La dilatation du fer pourrait s'obtenir de la même manière, mais MM. Dulong et Petit ont préféré le moyen suivant. Une tige de fer a été fixée dans l'axe d'un tube pareil à celui de l'expérience précédente, et ensuite, après avoir rempli ce tube de mercure sec et purgé d'air, on l'a porté successivement aux températures de 100, 200 et 300°; on a recueilli le mercure qui s'est échappé, et on en a pris le poids. De cette manière, il y a trois corps qui concourent à l'expérience, savoir : le tube de verre, la tige de fer et le mercure qui remplit le tube; et il est facile d'avoir leur volume à 0. Le volume du verre s'obtient par le poids du mercure qu'il peut contenir; la volume de la tige de fer s'obtient en prenant son poids, et en le divisant par sa densité; enfin le volume du mercure n'est que la différence des deux premiers. Avec ces données, on déduit facilement la dilatatiou du fer entre la température 0 et une autre température connue. Par ce procédé, on a l'avantage d'arriver directement à la dilatation cubique, tandis qu'en y arrivant par la dilatation linéaire, on triple l'erreur dont la dilatation linéaire est elle-même susceptible.

On pourrait faire la même expérience sur tous les corps, en prenant soin seulement d'oxider leur surface pour les soustraire à l'action dissolvante du mercure; mais, connaissant une fois les dilatations précises de quelques solides, il y a un moyen sûr d'en déduire par comparaison les dilatations de tous les autres; c'est le moyen de Borda, duquel on a fait une si heureuse application dans la mesure de la méridienne; il consiste à assembler la règle dont on cherche la dilatation avec une règle d'une autre substance, dont la dilatation soit connue (*Fig.* 169). Cet assemblage forme le *pyromètre de Borda*.

Les deux règles sont posées l'une sur l'autre dans toute leur longueur; elles sont réunies d'une manière invariable, à l'une de leurs extrémités seulement, par une forte traverse en fer, à laquelle elles sont fixées solidement par des

vis. Chaque règle porte, à son autre extrémité, une tige de laiton qui s'élève d'abord verticalement, et ensuite se recourbe horizontalement. Les branches horizontales de ces deux pièces additionnelles peuvent glisser l'une sur l'autre, quand les deux règles s'allongent inégalement; et, sur la ligne où elles se joignent, elles sont divisées en parties égales très-petites, de manière que 20 divisions de l'une d'elles soient, par exemple, équivalentes à 19 divisions de l'autre; celle-ci portant, je suppose, des cinquièmes de millimètre, on pourra, par la coïncidence des divisions, estimer des vingtièmes de cinquièmes ou des centièmes de millimètres. Cette coïncidence s'observe à la loupe, comme dans les verniers ordinaires. Les règles de MM. Dulong et Petit avaient 12 décimètres de longueur, 25 millimètres de largeur et 4 millimètres d'épaisseur. Une différence de température de 1° produisait un déplacement correspondant à peu près à une partie du vernier. Le pyromètre étant porté, par exemple, de la température 0 à la température de 100°, les deux règles s'allongeaient inégalement, la pièce additionnelle de la plus dilatable glissait sur la pièce additionnelle de l'autre, par exemple, de 100 parties du vernier, qui formaient une longueur absolue de 1 millimètre. Connaissant ainsi la différence des dilatations linéaires des deux règles, connaissant d'ailleurs la dilatation linéaire de l'une d'elles, et sa longueur primitive, il était facile d'en déduire la dilatation linéaire de l'autre.

178. Nous avons réuni dans le tableau suivant les dilatations qui ont été déterminées par les plus habiles observateurs.

## *Tableau des dilatations des solides.*

| DÉSIGNATION des SUBSTANCES. | INTERVALLE de température | DILATATIONS EN FRACTIONS décimales. | vulgaires. |
|---|---|---|---|
| *Suivant MM. Lavoisier et Laplace.* | | | |
| Flintglass anglais. . . . . . . . | 0 à 100° | 0,00081166 | 1/1248 |
| Platine (selon Borda). . . . . | » » | 0,00085655 | 1/1167 |
| Verre de France avec plomb. . | » » | 0,00087199 | 1/1147 |
| Tube de verre sans plomb. . . | » » | 0,00087572 | 1/1142 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00089694 | 1/1115 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00089760 | 1/1114 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00091750 | 1/1090 |
| Verre de Saint-Gobain. . . . . | » » | 8,00089089 | 1/1122 |
| Acier non trempé. . . . . . . | » » | 0,00107880 | 1/927 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00107915 | 1/927 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00107960 | 1/926 |
| Acier trempé jaune, recuit à 65°. . . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00123956 | 1/807 |
| Fer doux forgé. . . . . . . . . | » » | 0,00122045 | 1/819 |
| Fer rond passé à la filière. . . | » » | 0,00123504 | 1/812 |
| Or de départ. . . . . . . . . . . | » » | 0,00146606 | 1/682 |
| Or au titre de Paris, recuit. . | » » | 0,00151361 | 1/661 |
| *Idem*, non recuit. . . . . . . . | » » | 0,00155155 | 1/645 |
| Cuivre. . . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00171220 | 1/584 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00171733 | 1/582 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00172240 | 1/581 |
| Cuivre jaune ou laiton. . . . . | » » | 0,00186670 | 1/535 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00187821 | 1/533 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00188970 | 1/529 |
| Argent au titre de Paris. . . . | » » | 0,00190868 | 1/524 |
| Argent de coupelle. . . . . . | » » | 0,00190974 | 1/524 |
| Étain des Indes ou de mélac. | » » | 0,00193765 | 1/516 |
| Étain de Falmoulth. . . . . . | » » | 0,00217298 | 1/462 |
| Plomb. . . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00284836 | 1/351 |
| *Suivant Smeaton.* | | | |
| Verre blanc (tubes de barom.) | 0 à 100 | 0,00083333 | 1/1175 |
| Régule martial d'antimoine. . | » » | 0,00108333 | 1/923 |
| Acier poule. . . . . . . . . . | » » | 0,00115000 | 1/870 |
| Acier trempé. . . . . . . . . . | » » | 0,00122500 | 1/816 |
| Fer. . . . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00125833 | 1/795 |
| Bismuth. . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00139167 | 1/719 |
| Cuivre rouge battu. . . . . . . | » » | 0,00170000 | 1/588 |
| Cuivre rouge 8 part., étain 1. . | » » | 0,00181667 | 1/550 |
| Cuivre jaune fondu. . . . . . . | » » | 0,00187500 | 1/533 |
| Cuivre jaune 16 part., étain 1. | » » | 0,00190833 | 1/524 |

| DÉSIGNATION des SUBSTANCES. | INTERVALLE de température | DILATATIONS EN FRACTIONS décimales. | DILATATIONS EN FRACTIONS vulgaires. |
|---|---|---|---|
| Fil de laiton. . . . . . . . . . | 0 à 100° | 0,00193333 | 1/517 |
| Métal de miroir de télescope. | » » | 1,00193333 | 1/517 |
| Soudure, cuiv. 2, zinc 1 part. | » » | 0,00205833 | 1/486 |
| Étain fin. . . . . . . . . . . . | » » | 0,00228333 | 1/438 |
| Étain en grains.. . . . . . . . | » » | 0,00248333 | 1/403 |
| Soudure blanche, étain 1 partie, plomb 2. . . . . . . . . | » » | 0,00250533 | 1/399 |
| Zinc 8 parties, étain 1, un peu forgé. . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00269167 | 2/372 |
| Plomb . . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00286667 | 1/349 |
| Zinc. . . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00294167 | 1/340 |
| Zinc allongé au marteau de 1/12 | » » | 0,00310833 | 1/322 |
| *Suivant le major-général Roy.* | | | |
| Verre en tube. . . . . . . . . | 0 à 100 | 0,00077550 | 1/1289 |
| Verre en verge solide. . . . . | » » | 0,00080833 | 1/1237 |
| Fer fondu (prisme de). . . . . | » » | 0,00111000 | 1/901 |
| Acier (verge d'). . . . . . . . | » » | 0,00114450 | 1/874 |
| Cuivre jaune de Hambourg. . . | » » | 0,00185550 | 1/539 |
| Cuivre jaune angl., en forme de verge. . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00189296 | 1/528 |
| Cuivre jaune angl., en forme d'auge ou de canal rectang. . | » » | 0,00189450 | 1/528 |
| *Suivant M. Troughton.* | | | |
| Platine. . . . . . . . . . . . . | 0 à 100 | 0,00099180 | 1/1008 |
| Acier. . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00118990 | 1/840 |
| Fer tiré à la filière. . . . . . | » » | 0,00144010 | 1/694 |
| Cuivre. . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00191880 | 1/521 |
| Argent. . . . . . . . . . . . . | » » | 0,00208260 | 1/480 |
| *Suivant M. Wollaston.* | | | |
| Palladium. . . . . . . . . . . . | 0 à 100 | 0,00100000 | 1/1000 |
| *Suivant MM. Dulong et Petit.* | | | |
| Platine. . . . . . . . . . . . . | 0 à 100 | 0,00088420 | 1/1131 |
| | 0 à 300 | 0,00275482 | 1/363 |
| Verre. . . . . . . . . . . . . . | 0 à 100 | 0,00086133 | 1/1161 |
| | 0 à 200 | 0,00184502 | 1/544 |
| | 0 à 300 | 0,00303252 | 1/329 |
| Fer. . . . . . . . . . . . . . . | 0 à 100 | 0,00118210 | 1/846 |
| | 0 à 300 | 0,00440528 | 1/227 |
| Cuivre. . . . . . . . . . . . . | 0 à 100 | 0,00171820 | 1/582 |
| | 0 à 300 | 0,00564972 | 1/177 |

179. La dilatation des corps solides paraît, en général, très-sensiblement uniforme entre 0 et 100°; mais on peut juger, par les résultats de MM. Dulong et Petit, que pour des températures plus hautes, la dilatation devient toujours irrégulière et toujours croissante.

Dans une certaine étendue de l'échelle thermométrique l'acier trempé se contracte au lieu de se dilater; c'est une exception remarquable qui tient sans doute à l'état forcé où se trouvent les molécules. L'élévation de température leur donne plus de liberté pour se rapprocher et pour prendre la place qu'elles auraient prise, sans le refroidissement subit qui est venu les saisir, et donner à leur ensemble l'état particulier qui constitue la trempe. On peut tirer parti de cette propriété pour beaucoup d'applications utiles.

180. Connaissant les dilatations linéaires des corps solides, il est facile d'en déduire leurs dilatations cubiques, et de calculer ensuite tous les changemens de volume par lesquels doit passer un corps de forme et de dimensions données. Lorsqu'on examine les effets de la chaleur dans des corps diversement repliés sur eux-mêmes, ou dans des vases de diverses figures, on ne voit pas d'abord s'ils doivent s'agrandir ou se rétrécir, ni dans quel sens ils doivent éprouver ces changemens; mais, de l'ensemble des expériences, il paraît résulter ce principe général, qu'un espace quelconque, terminé par des parois d'une substance homogène, se dilate exactement comme se dilaterait une masse solide de même substance et de même forme. Ainsi le volume intérieur d'un tube de verre se dilate, comme le cylindre de verre qui serait capable de le remplir; la capacité intérieure d'une sphère se dilate comme la sphère massive qui la pourrait remplir, etc.

181. La *puissance de dilatation* d'un corps est égale à la *résistance de compression* dont il est capable. S'il faut un poids de mille kilogrammes pour réduire la longueur d'une barre de fer verticale autant que la réduirait un abaissement

de température de 1°, il est évident qu'en la chargeant à sa partie supérieure du poids de mille kilogrammes et en la chauffant de 1°, la dilatation due à la chaleur compensera la compression due à la charge, et sa longueur restera la même. C'est d'après ce principe que l'on peut juger des efforts prodigieux qu'exercent les corps en se dilatant ou en se contractant. Les liquides étant peu compressibles et très-dilatables sont, de tous les corps, ceux qui peuvent produire les plus grands effets de cette nature. Parmi les corps solides, le fer et la fonte ont pareillement une grande puissance de dilatation : c'est pour cela que dans les grands ouvrages où l'on doit mettre bout à bout des barres de fer sur une longueur de plusieurs centaines de mètres, on les ajuste de distance en distance, pour que l'extrémité d'une barre puisse s'engager dans l'extrémité de la barre suivante, sans la presser. Dans les tuyaux de conduite, l'ajustement est un peu plus difficile; mais on y parvient cependant avec des lames de plomb, dont on enveloppe l'extrémité du tuyau qui doit s'engager dans l'extrémité plus large du tuyau suivant.

182. La *puissance de contraction* des solides est égale à la *résistance de traction* qu'ils peuvent opposer. S'il faut un poids de mille kilogrammes pour donner à une barre de fer verticale un allongement égal à celui qu'elle prendrait pour une augmentation de température de 1°, il est évident que, si on la charge à son extrémité inférieure du poids de mille kilogrammes, et qu'en même temps on la refroidisse de 1°, la contraction du refroidissement compensera l'allongement de la traction, et la longueur restera la même que si la barre n'était ni refroidie de 1° ni tirée par mille kilogrammes. La tenacité du fer étant très-grande, on a pu profiter de cette propriété pour exercer des efforts qui auraient en quelque sorte surpassé nos autres moyens mécaniques. C'est ainsi, par exemple, que l'on voit, au conservatoire des arts et métiers, de longues barres de fer, traversant

deux murs opposés, et qui ont servi à rapprocher ces murs, malgré l'énorme pression qui les écartait de leur aplomb naturel. C'est à M. Molard que l'on doit cette ingénieuse application des lois du refroidissement. Les barres étant mises en place, on les chauffait dans toute leur longueur, et, tandis qu'elles étaient dilatées, on serrait des écrous qui étaient en dehors des murs; alors la puissance de contraction, produite par l'abaissement de température, rapprochait invinciblement les deux extrémités des barres, et par conséquent les obstacles qui s'y opposaient.

Comme une barre de métal se rompt sous un effort suffisant, elle se rompt pareillement par la contraction, quand ses extrémités sont tellement arrêtées, qu'elles ne puissent se rapprocher l'une de l'autre dans une proportion convenable. On en voit de trop fréquens exemples dans les longues pièces de métal qui sont mises en œuvre pendant les chaleurs de l'été, et qui ne sont pas scellées avec assez de précautions.

Les ingénieurs ont sans cesse occasion d'appliquer ces principes dans les grandes constructions dont ils sont chargés.

183. *Lame de compensation.* — Cet appareil se compose de deux ou de plusieurs lames de différente nature, qui sont clouées ou soudées dans toute leur longueur (*Fig.* 173, 174 et 175). Si l'une de ces lames est de fer et l'autre de cuivre, et qu'elles aient la même longueur à une température donnée, par exemple à 10°, il est évident qu'à 10° la lame de compensation sera droite, et qu'au dessus et au dessous de cette température elle sera courbée dans des sens différens. Au dessus de 10°, le cuivre *c* se dilatant plus que le fer *f*, le cuivre enveloppera le fer dans sa courbure (*Fig.* 175); au contraire, au dessous de 10°, le cuivre sera enveloppé par le fer, qui conservera plus de longueur (*Fig.* 173). Ces lames de compensation peuvent servir à une foule d'usages, et surtout à *compenser* les montres et les horloges.

184. Tout le monde sait que dans les chronomètres, comme dans les montres, c'est le ressort qui est le moteur, et le balancier qui est le régulateur. Par les changemens de température, toutes les pièces sont altérées dans leur volume, et la masse du balancier B (*Fig.* 189) est portée plus loin ou plus près de l'axe autour duquel elle fait ses oscillations. On conçoit donc qu'en y ajustant des lames de compensation *l*, *l*, qui se rapprochent du centre quand le cercle se dilate, et qui s'en éloignent au contraire, quand le cercle se contracte, on puisse atteindre à une assez juste compensation, pour se mettre complètement à l'abri des variations de température. Au lieu de faire porter la compensation directement sur la masse du balancier, on réussit mieux à produire l'isochronisme, en modifiant tantôt l'épaisseur, tantôt la longueur du ressort spiral que le balancier fait mouvoir. C'est ainsi que MM. Bréguet sont parvenus à faire des chronomètres d'une précision si surprenante, qu'en comparant leur marche à la marche des étoiles, on trouve que dans le cours d'une année les plus grands écarts de leurs variations diurnes ne s'élèvent pas à 1''. C'est là, sans doute, le plus haut degré de perfection que l'art puisse donner à la matière dans des appareils si délicats et si compliqués.

185. Nous avons déja vu (52) que les horloges avancent ou retardent suivant qu'il fait plus froid ou plus chaud, et que, pour obvier à cet inconvénient, il faut empêcher le centre d'oscillation de remonter, quand la tige se refroidit, et de descendre quand elle se réchauffe. Les lames de compensation convenablement ajustées peuvent produire cet effet; il suffit pour cela que leur masse se relève et se rapproche du point de suspension, tandis que la masse de la lentille s'en éloigne, et *vice versâ*. Mais le pendule compensateur est d'un usage encore plus sûr et plus commode.

186. *Pendule compensateur.* — Cet appareil est représenté *fig.* 184. Les deux tiges extrêmes sont de fer : les deux tiges

moyennes sont de cuivre. Par la dilatation des premières, le centre d'oscillation descend; au contraire, il est relevé par la dilatation des deux dernières; et, lorsqu'on a la connaissance exacte des variations linéaires que ces métaux éprouvent, il suffit de quelques tâtonnemens pour produire une compensation très-exacte. Mais on conçoit que l'art difficile de l'horlogerie ne se réduit pas à fabriquer des horloges dont les pendules soient bien compensés. Il y a une telle correspondance entre toutes les pièces, une telle action de l'une sur l'autre, qu'il faut en quelque sorte que la compensation se fasse d'elle-même, sur chaque dent et sur chaque pivot des rouages. On sait quelle célébrité Berthoud et Bréguet se sont acquis dans toute l'Europe, et l'on peut juger de la perfection de leurs ouvrages, lorsqu'on sait qu'une pendule de Bréguet, par exemple, soumise à des variations de température, qui vont jusqu'à 12° ou 15° au dessous de 0, peut suivre le cours des astres pendant une année entière, sans se déranger de $\frac{1}{2}$ seconde.

187. La dilatation est une loi générale de la matière, et, s'il se trouve des corps qui, sous l'influence de la chaleur, semblent se soustraire à cette loi, on peut juger d'avance que c'est une exception dépendante de quelque circonstance particulière; par exemple, si les substances végétales et animales se retirent sur elle-mêmes au lieu de se dilater, c'est qu'elles perdent par la chaleur quelques fluides, qui sont combinés avec elles d'une manière plus ou moins intime. Il en est de même des terres de différente espèce, qui sont plus ou moins imbibées d'eau; elles semblent se contracter par la chaleur, mais cet effet résulte seulement de ce qu'elles se dessèchent encore plus qu'elles ne se dilatent.

## CHAPITRE VI.

*De la densité des gaz, des liquides et des solides.*

188. Nous avons vu (45) que la pesanteur spécifique ou la densité d'un corps est le rapport de son poids à son volume. L'objet qu'on se propose dans la recherche des densités est moins de pouvoir trouver combien pèse un corps, sous un volume donné, que de pouvoir comparer entre elles les densités de tous les corps différens que nous présente la nature. On prend donc pour unité une densité connue, et l'on cherche combien de fois les autres la contiennent. L'unité que l'on choisit pour les gaz est la densité de l'air atmosphérique, parce que l'air se trouve partout, et que partout il se compose des mêmes élémens chimiques, combinés dans la même proportion. L'unité que l'on choisit pour les autres corps est la densité de l'eau distillée, parce que l'eau se trouve aussi partout, et qu'il est facile, en la distillant, de la rendre parfaitement pure. Ensuite le rapport entre la densité de l'air et celle de l'eau donne le moyen d'établir la comparaison entre les densités de tous les corps connus.

189. *Densité des gaz.* — A volume égal, les densités des corps sont entre elles comme leurs poids (45); ainsi, pour avoir les densités des gaz par rapport à l'air, il suffit de peser un volume d'air et un volume égal de tous les autres gaz, à la même température et sous la même pression. On y parvient en prenant un grand ballon de 8 ou 10 litres de capacité, que l'on pèse après y avoir fait le vide, et que l'on pèse ensuite après l'avoir rempli successivement d'air sec et des gaz de différente nature dont on veut avoir les densités. Comme il est impossible de faire le vide parfait, on tient compte, par le calcul, de la petite quantité d'air qui reste; et comme toutes les pesées ne peuvent se faire dans

des circonstances exactement pareilles, il y a de nombreuses corrections à faire pour les variations de température, de pression et d'humidité de l'air extérieur.

190. Nous avons rassemblé dans le tableau suivant les densités des gaz et des vapeurs.

*Tableau des densités des gaz et des vapeurs.*

| DÉSIGNATION des FLUIDES ÉLASTIQUES. | DENSITÉS determinées par expérience. | DENSITÉS calculées. | POIDS de 1 litre à 0° et 760 de pression. | NOMS des observateurs. |
|---|---|---|---|---|
| Air. . . . . . . . . . . . . . . . | 1,0000 | | 1,2991 | |
| Gaz hydriodique. . . . . . . . | 4,4288 | 4,3399 | 5,7719 | Gay-Lussac. |
| chloroxi-carbonique. . . . | | 3,3990 | 4,4156 | J. Davy. |
| chlore . . . . . . . . . . . | 2,4216 | 2,4260 | 3,2088 | Gay et Thénard. |
| deutoxide de chlore. . . . | | 2,3155 | 3,0081 | J. Davy. |
| sulfureux . . . . . . . . . | 2,1930 | | 2,8489 | H. Davy. |
| cyanogène. . . . . . . . . | 1,8064 | 1,8197 | 2,3467 | Gay-Lussac. |
| protoxide d'azote . . . . . | 1,5269 | 1,5269 | 1,9752 | Colin. |
| acide carbonique. . . . . . | 1,5245 | | 1,9805 | Berzél. et Dulong. |
| hydro-chlorique. . . . . . | 1,2474 | 1,2474 | 1,6205 | Biot et Arago. |
| hydro-sulfurique . . . . . | 1,1912 | | 1,5475 | Gay et Thénard. |
| oxigène . . . . . . . . . . | 1,1026 | | 1,4323 | Berzél. et Dulong. |
| deutoxide d'azote . . . . . | 1,0388 | 1,0390 | 1,3495 | Bérard. |
| hydrogène-bi-carburé. . . | | 0,9816 | 1,2752 | Thomson. |
| azote . . . . . . . . . . . | 0,9757 | | 1,2675 | Berzél. et Dulong |
| oxide de carbone . . . . . | 0,9569 | 0,9732 | 1,2431 | Cruikshancks. |
| hydrogène per-phosphoré . | 0,9022 | | | Thomson. |
| hydrog. proto-phosphoré . | 0,8700 | | | H. Davy. |
| ammoniacal. . . . . . . . | 0,5967 | 0,5910 | 0,7752 | Biot et Arago. |
| hydrogène proto-carburé . | | 0,5596 | 0,7270 | Thomson. |
| hydrogène. . . . . . . . . | 0,0688 | | 0.0894 | Berzél. et Dulong. |
| Vapeur de perchlorure d'étain . | 9,200 | 8,993 | 11,951 | Dumas. |
| d'iode . . . . . . . . . . . | 8,716 | 8,612 | 11,323 | id. |
| de perchlorure de titane . | 6,856 | 7,047 | 8,881 | id. |
| de mercure . . . . . . . . | 6,976 | 6,978 | 9,062 | id. |
| de proto-clorure d'arsenic. | 6,301 | 6,297 | 8,185 | id. |
| de chlorure de silicium . . | 5,939 | 5,960 | 7,715 | id. |
| d'éther hydriodique . . . . | 5,475 | » | 7,112 | Gay-Lussac. |
| d'essence de téréhenthine . | 5,013 | 4,211 | 6,512 | id. |
| de protochlor. de phosphore | 4,875 | 4,808 | 6,353 | Dumas. |
| de chlorure de hore. . . . | 3,942 | 4,079 | 5,121 | id. |
| d'acide fluorique silicé. . . | 3,600 | 3,597 | » | id. |
| d'hydro-bi-carb. de chlore | 3,443 | 3,408 | 4,473 | |
| nitreuse. . . . . . . . . . | » | 3,180 | 4,132 | Colin et Robiquet. |
| d'hydrogène arseniqué . . | 2,695 | 2,695 | 3,502 | Dumas. |
| de sulfure de carbone . . . | 2,645 | » | 3,436 | Gay-Lussac. |
| d'éther sulfurique. . . . . | 2,586 | 2,583 | 3,395 | id. |
| d'acide fluo-borique. . . . | 2,312 | 2,307 | » | id. |
| d'éther hydro-chlorique. . | 2,2190 | 2,2290 | 2,8827 | Thénard |
| d'acide chloro-cyanique. . | | 2,1228 | 2.7577 | Gay-Lussac. |
| d'alcool absolu . . . . . . | 1,6133 | 1,6016 | 2,0958 | id. |
| d'acide hydro-cyanique . . | 0,9476 | 0,9442 | 1,2310 | id. |
| d'eau . . . . . . . . . . . | 0,6235 | 0,6200 | 0,8100 | id. |
| de carbone . . . . . . . . | | 0,4220 | 0,5482 | |

191. Les DENSITÉS calculées se déduisent des combinaisons chimiques, par des considérations dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer ici.

192. Si l'on représente par D la densité d'un gaz à la température 0, sous la pression de $760^{mm}$, et par D′ la densité du même gaz à la température de $t°$, sous la pression H, il est très-facile de trouver la relation qui existe entre les deux densités, les deux pressions et les deux températures. En effet, prenant, par exemple, 1 centimètre cube du gaz dans les premières circonstances, ce centimètre cube deviendra $1 + at$, en passant à la température $t$ ($a$ étant le coefficient de dilatation 0,00375), et en passant de la pression 760 à la pression H, ce volume deviendra

$$\frac{(1 + at)\,760}{H},$$

puisque les volumes sont en raison inverse des pressions. Or, le poids restant le même, les densités sont en raison inverse des volumes, donc

$$D : D' :: \frac{(1 + at)\,160}{H} : 1;$$

d'où

$$D' = D\frac{H}{760\,(1 + at)}.$$

Un autre gaz dont la densité serait $D_1$ à la température 0, sous la pression de 760, et $D'_1$ à la température $t$, sous la pression H, donnerait pareillement

$$D'_1 = D_1\frac{H}{760\,(1 + at)};$$

d'où il résulte

$$\frac{D'}{D'_1} = \frac{D}{D_1};$$

c'est à-dire que les densités des gaz conservent le même rapport à toute température et à toute pression. Ainsi, à

la température rouge, comme la température o, sous la pression de 100 atmosphères, comme sous la pression d'une seule atmosphère, la densité de l'hydrogène, par exemple, sera toujours 0,0688 ou environ $\frac{1}{15}$ de la densité de l'air, soumis aux mêmes circonstances. Cette vérité fondamentale est facile à comprendre directement, lorsqu'on se rappelle que la loi de Mariotte, pour la compression, et la loi de M. Gay-Lussac, pour la dilatation, sont deux lois communes à tous les gaz, quelle que soit leur nature.

193. Avec les données précédentes, on peut trouver, par un calcul très-simple, la densité d'un mélange gazeux, formé dans des proportions connues en poids ou en volumes. Réciproquement, la densité d'un mélange étant connue, on en peut déduire la densité, le poids ou le volume de l'un de ses élémens, lorsque toutes les autres choses sont déjà déterminées.

194. *Densité de l'eau distillée.* — Tous les corps changent de volume à chaque instant, par l'influence de la chaleur; ainsi à chaque instant ils changent de densité. Mais dans la loi de ces variations, l'eau présente une exception remarquable : à partir de o, lorsqu'on élève sa température, elle se retire sur elle-même, au lieu de se dilater, et elle se retire de plus en plus, jusqu'à la température d'environ 4°; ensuite, en la chauffant davantage, elle commence à éprouver une expansion, comme font tous les autres corps, et, dès cet instant, sa dilatation est continuellement croissante jusqu'à l'ébullition. Vers la température de 4°, l'eau éprouve donc un *maximum de contraction*. Ce phénomène est frappant, lorsqu'on l'observe sur un thermomètre à eau, dont chaque degré occupe une assez grande étendue. Ce thermomètre descend comme le thermomètre à mercure, lorsqu'on les plonge ensemble dans un bain liquide, qui est, par exemple, à 10°, et que l'on refroidit peu à peu; mais, aux approches du 4e degré, le refroidis-

sement augmentant, et le thermomètre à mercure continuant de descendre, on voit le thermomètre à eau qui remonte, comme si on le chauffait, et qui remonte ainsi jusqu'à la température de la glace. En poussant le refroidissement plus loin, l'eau du thermomètre se gèle, et prend tout à coup un accroissement de volume très-considérable; on peut donc présumer qu'à partir de 4° les molécules liquides commencent à s'écarter l'une de l'autre, et qu'elles se préparent en quelque sorte à prendre les positions respectives qu'elles doivent avoir pour passer à l'état solide. L'eau qui tient en dissolution quelques sels, ou d'autres substances étrangères, paraît présenter encore les propriétés du maximum de contraction et de l'accroissement de volume, par la congélation; mais, comme elle se gèle à une température plus basse que 0, c'est aussi à une température plus basse que 4° qu'elle éprouve son maximum de contraction. Ces phénomènes ne semblent d'abord que des exceptions fortuites et de peu d'importance; mais nous verrons plus tard qu'ils ont une grande influence sur la distribution de la chaleur dans l'étendue des mers et de tous les continens. C'est par là que dans les latitudes élevées, les rivières, les lacs et les mers peuvent rester liquides à une certaine profondeur; c'est par là que les êtres vivans qui peuplent les eaux peuvent se conserver dans toutes les saisons et se perpétuer; c'est par là enfin qu'il s'établit une circulation de chaleur entre les pôles et l'équateur, et une température moyenne qui est plus modérée dans tous les climats.

Le point précis du maximum de contraction, et les différentes densités de l'eau, à diverses températures, ont été l'objet d'un grand nombre de recherches. Entre tous les résultats qui ont été donnés par tant d'habiles observateurs, nous choisirons ceux de M. Hallstrom, qui se recommandent par la rigueur de la méthode, et par l'exactitude des expériences. Voici le tableau de ses résultats.

*Densités et volumes de l'eau de 0 à 30° centigrades.*

| Température | En prenant pour unités la densité et le volume à 0. | | En prenant pour unités la densité et le volume à 4°,1. | |
|---|---|---|---|---|
| | Pesanteurs spécifiques. | Volumes. | Pesanteurs spécifiques. | Volumes. |
| 0° | 1,0 | 1,0 | 0,9998918 | 1,0001082 |
| 1 | 1,0000466 | 0,9999536 | 0,9999382 | 1,0000617 |
| 2 | 1,0000799 | 0,9999202 | 0,9999717 | 1,0000281 |
| 3 | 1,0001004 | 0,9998996 | 0,9999920 | 1,0000078 |
| 4 | 1,00010817 | 0,9998918 | 0,9999995 | 1,0000002 |
| 4,1 | 1,00010824 | 0,99989177 | 1,0 | 1,0 |
| 5 | 1,0001032 | 0,9998968 | 0,9999950 | 1,0000050 |
| 6 | 1,0000856 | 0,9999144 | 0,9999772 | 1,0000226 |
| 7 | 1,0000555 | 0,9999445 | 0,9999472 | 1,0000527 |
| 8 | 1,0000129 | 0,9999872 | 0,9999044 | 1,0000954 |
| 9 | 0,9999579 | 1,0000421 | 0,9998497 | 1,0001501 |
| 10 | 0,9998906 | 1,0001094 | 0,9997825 | 1,0002200 |
| 11 | 0,9998112 | 1,0001888 | 0,9997030 | 1,0002970 |
| 12 | 0,9997196 | 1,0002804 | 0,9996117 | 1,0003888 |
| 13 | 0,9996160 | 1,0003841 | 0,9995080 | 1,0004924 |
| 14 | 0,9995005 | 1,0004997 | 0,9993922 | 1,0006081 |
| 15 | 0,9993731 | 1,0006273 | 0,9992647 | 1,0007357 |
| 16 | 0,9992340 | 1,0007666 | 0,9991260 | 1,0008747 |
| 17 | 0,9990832 | 1,0009176 | 0,9989752 | 1,0010259 |
| 18 | 0,9989207 | 1,0010805 | 0,9988125 | 1,0011888 |
| 19 | 0,9987468 | 1,0012548 | 0,9986387 | 1,0013631 |
| 20 | 0,9985615 | 1,0014406 | 0,9984534 | 1,0015490 |
| 21 | 0,9983648 | 1,0016379 | 0,9982570 | 1,0017560 |
| 22 | 0,9981569 | 1,0018465 | 0,9980489 | 1,0019549 |
| 23 | 0,9979379 | 1,0020664 | 0,9978300 | 1,0021746 |
| 24 | 0,9977077 | 1,0022976 | 0,9976000 | 1,0024058 |
| 25 | 0,9974666 | 1,0025398 | 0,9973587 | 1,0026483 |
| 26 | 0,9972146 | 1,0022932 | 0,9971070 | 1,0029016 |
| 27 | 0,9969518 | 1,0030575 | 0,9968439 | 1,0031662 |
| 28 | 0,9966783 | 1,0033328 | 0,9965704 | 1,0034414 |
| 29 | 0,9963941 | 1,0036189 | 0,9962864 | 1,0037274 |
| 30 | 0,9960993 | 1,0039160 | 0,9959917 | 1,0040245 |

M. Hällström trouve le maximum de contraction à 4°,108; mais en discutant toutes les probabilités des erreurs, il pense que, dans cette détermination difficile, on peut se tromper de 0°,238, en plus ou en moins. Nous adopterons donc 4°,1 comme étant le nombre qui est probablement

le plus exact. Dans le premier tableau, on a pris pour unité la densité à o, et le volume à o; dans le second, on a pris pour unité la densité maximum et le volume minimum, c'est-à-dire à 4°,1. C'est par le principe d'Archimède (95) que M. Hällström est parvenu à ces résultats. Le corps plongé qu'il employait était une boule creuse de verre, lestée avec du sable, de manière à être très-peu pesante dans l'eau; il la suspendait par un cheveu à une balance hydrostique très-sensible, et il cherchait les diverses pertes de poids qu'elle éprouvait dans l'eau, à toutes les températures comprises entre o et 30°. La dilatation du verre étant déterminée d'avance avec beaucoup de soin, il pouvait calculer pour chaque expérience le volume et le poids de l'eau déplacée, et par conséquent sa densité.

195. *Densité des liquides.* — Le principe d'Archimède, servant à comparer entre elles les densités de l'eau à diverses températures, peut servir pareillement à trouver les densités de tous les liquides. Si l'on veut, par exemple, connaître la densité de l'alcool par rapport à celle de l'eau, il suffira de prendre un corps solide plus dense que ces liquides, et d'en faire trois pesées successives : la première dans l'air, la seconde dans l'eau, et la troisième dans l'alcool. La perte de poids que ce corps fait dans l'eau est égale au poids de l'eau qu'il déplace (95), et la perte de poids qu'il fait dans l'alcool est pareillement égale au poids de l'alcool. Or, la température étant la même, les volumes des liquides déplacés sont aussi les mêmes, donc le rapport de leur poids est égal au rapport de leur densité. Quand les pesées sont faites à des températures différentes, on les réduit, par le calcul, à ce qu'elles seraient à la température o; mais pour cela il faut connaître la loi de dilatation du corps plongé et celle de chaque liquide.

On peut déterminer aussi la densité des liquides par les *pesées directes* d'un même volume de tous ces corps. Pour y parvenir par ce second procédé, on prend un petit flacon

de verre, ayant un bouchon à l'émeri, qui le ferme d'une manière très-exacte; on le pèse seul, et on le pèse ensuite rempli d'un liquide : la différence des poids est le poids du liquide qu'il contient.

| | | |
|---|---|---|
| Par exemple : | Le flacon seul pèse | 100 gr. |
| | Le flacon plein d'eau à 0 pèse | 200 gr. |
| Le poids de l'eau contenue dans le flacon est | | 100 gr. |
| A la même température de 0 | | |
| | Le flacon seul pèse toujours | 100 |
| | Le flacon plein d'alcool pèse | 179 |
| Le poids de l'alcool contenu dans le flacon est | | 79 |

Les volumes d'eau et d'alcool étant les mêmes, les densités de ces liquides sont entre elles comme les poids; donc la densité de l'alcool est 0,79.

Lorsque la température n'est pas 0, il faut corriger les résultats des effets que produit la dilatation, sur le verre du flacon et sur les liquides que l'on soumet à l'expérience.

196. Le tableau suivant contient les résultats les plus usuels.

*Densité des liquides, en prenant pour unité la densité de l'eau à 0.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Acide sulfurique | 1,8409 | Vin de Bourgogne | 0,9215 |
| Acide nitreux | 1,5500 | Huile d'olive | 0,8153 |
| Eau de la mer Morte | 1,2403 | Ether muriatique | 0,8740 |
| Acide nitrique | 1,2175 | Huile essentielle de téré-benthine | 0,8697 |
| Eau de la mer | 1,0263 | Bitume liquide de *naphte* | 0,8475 |
| Lait | 1,0300 | Alcool absolu | 0,7920 |
| Eau distillée | 1,0000 | Ether sulfurique | 0,7155 |
| Vin de Bordeaux | 0,9939 | | |

197. *Des Aréomètres.* — Les aréomètres sont des flotteurs qui donnent immédiatement les densités des liquides dans lesquels ils s'enfoncent.

On distingue deux sortes d'aréomètres, les aréomètres à poids variable, et les aréomètres à volume variable.

La *figure* 186 représente un *aréomètre à poids variable;* V est le *volume* ou le *corps* de l'instrument; on le fait en verre ou en fer-blanc; L est le *lest*, c'est-à-dire une petite masse de mercure ou de plomb, que l'on ajuste la partie inférieure; *t* est la *tige*, qui doit être très-déliée; enfin *c* est le *chapeau* sur lequel on doit mettre des poids. Quand l'instrument est dans un liquide, il se dispose d'après les conditions d'équilibre des corps flottans (97); il se tient debout à cause du leste qui rebaisse son centre de gravité, et il s'enfonce jusqu'à ce qu'il y ait égalité entre son poids et le poids du liquide qu'il déplace; alors on ajoute des *poids additionnels* sur le chapeau, pour *affleurer* l'instrument, c'est-à-dire pour qu'un petit trait *f*, marqué sur la tige, se trouve exactement *à fleur d'eau*. Dans les différens liquides, il faut des poids différens pour produire l'affleurement, et c'est pour cela qu'on l'appelle un aréomètre à poids variable. Soit P le poids de l'instrument, soient $p$ les poids additionnels qu'il faut y ajouter pour l'affleurer dans l'eau à 0, soient $p'$ les poids additionnels qu'il faut y ajouter pour l'affleurer dans l'alcool à 0, la densité de l'alcool sera à la densité de l'eau, comme $P + p'$ est à $P + p$.

L'aréomètre est d'autant plus sensible, que le volume plongé est plus considérable, et que la tige est plus fine.

On conçoit que, pour éviter les calculs, il est possible de former, pour chaque instrument, une table particulière, où l'on trouve immédiatement la densité à côté du poids additionnel $p'$.

198. L'*aréomètre à volume variable* est représenté *figure* 188; il a en général moins de volume que l'aréomètre à poids variable; la tige est un petit tube de verre creux; le corps de l'instrument est une boule soufflée à l'extrémité du tube; et le lest se loge dans le petit appendice en verre qui est au dessous de la boule; une bande de papier est soigneusement fixée dans l'intérieur de la tige, pour porter les divisions qui marquent les densités. Le poids de cet aréomètre

étant constant, il en résulte que les densités des liquides dans lesquels il s'enfonce, sont entre elles en raison inverse des volumes plongés. C'est d'après ce principe que l'on fait la graduation, et l'on écrit sur la bande de papier qui sert d'échelle les nombres qui expriment directement les densités des liquides. Ainsi quand l'aréomètre n'enfonce que jusqu'au nombre 1200, la densité est 1200, s'il enfonce jusqu'au nombre 900, la densité est 900, etc.; la densité de l'eau est représentée par 1000.

199. Les *pèse-liqueurs* sont des espèces d'aréomètres, qui ne sont pas gradués pour donner les densités des liqueurs dans lesquelles on les plonge, mais seulement pour donner leur *degré de concentration*. Les *acides* sont *étendus* d'une quantité d'eau plus ou moins grande, les *dissolutions salines* sont plus ou moins *saturées*, les *eaux-de-vie* et les *esprits* sont plus ou moins *riches en alcool*; et l'on a fait des *pèse-acides*, des *pèse-sels* et des *pèse-esprits*, pour reconnaître immédiatement les différens états dans lesquels ces liquides peuvent se présenter.

*Pèse-acide* ou *aréomètre de Beaumé.* — Cet aréomètre a toute l'apparence d'un aréomètre à volume variable; mais il en diffère essentiellement par sa graduation. Au point où il s'arrête dans l'eau pure, on marque 0; au point où il s'arrête dans un mélange de 85 parties d'eau et de 15 de sel ordinaire, on marque 15, on divise l'intervalle en 15 parties, et l'on continue les divisions au dessous. Deux dissolutions saturées à divers degrés marqueront évidemment des degrés différens sur l'aréomètre; la plus saturée marquera des degrés plus élevés, mais on n'en pourra rien conclure directement, ni sur les densités réelles de ces dissolutions, ni sur les proportions de sel qu'elles contiennent.

Les *pèse-sels* et les *pèse-esprits* sont gradués d'après des principes analogues; ils sont donc, comme le *pèse-acide*, des instrumens de commerce, plutôt que des instrumens de physique; car le degré aréométrique sert à régler le cours

des marchandises, sans rien indiquer sur la juste proportion des élémens qui les constituent.

200. *L'Alcoomètre centésimal de M. Gay-Lussac* est fondé sur de tout autres principes. Etant donné des esprits ou des eaux-de-vie, il suffit d'y plonger l'alcoomètre, pour connaître à l'instant leur force réelle, leur richesse en alcool et leur densité. Cet instrument, qui offre d'immenses avantages à la régie et au commerce, repose sur des recherches très-précieuses pour la science; son utilité, déjà démontrée par l'usage, a été sanctionnée par une loi. Il est nécessaire, pour en prendre une juste idée, de consulter *l'instruction pour l'usage de l'alcoomètre centésimal* que M. Gay-Lussac a publiée en 1824.

201. *Densité des corps solides.* — On détermine les densités des solides, comme celles des liquides, par trois procédés différens, savoir : au moyen de l'aréomètre, du flacon bouché ou de la balance hydrostatique.

202. L'aréomètre que l'on emploie pour déterminer les densités des corps solides, est un aréomètre à volume constant, qui s'appelle tantôt aréomètre de *Fahrenheit*, aréomètre de *Nicholson*, ou aréomètre-balance de *Charles*, suivant quelques légères modifications dans la disposition des pièces. Les *figures* 186 et 187 représentent l'aréomètre de Charles. Entre le corps V de l'instrument et le lest L, se trouve un petit panier ou un petit seau d'argent, destiné à recevoir les fragmens de matière dont on cherche la densité. Quand les corps sont plus pesans que l'eau, ils doivent exercer une pression de haut en bas; et le panier est accroché par l'anse (*Fig.* 186), afin de recevoir cettre pression; quand les corps sont spécifiquement plus légers que l'eau, ils doivent exercer une pression de bas en haut, et alors on retourne le panier et on l'accroche par le fond (*Fig.* 187), afin qu'il reçoive encore cette pression.

Pour trouver une densité par ce moyen, il faut, avant tout, connaître le *poids additionnel* qui doit être mis sur le

chapeau, pour affleurer l'instrument (197) dans l'eau distillée, c'est-à-dire pour le faire enfoncer jusqu'au trait *f* que porte la tige. Supposons qu'à la température o le poids additionnel soit de 25 grammes, et avec cette donnée, cherchons la densité d'un corps quelconque, d'un diamant, par exemple. On met le diamant seul sur le chapeau, et on ajoute successivement des poids, jusqu'à produire l'affleurement : soit 23gr.,8, ce qu'il faut ajouter; ces poids et le diamant équivalent ensemble à 25gr., puisque l'affleurement a lieu. Donc le diamant pèse 25gr. — 23,8 ou 1gr., 2; tel est son poids dans l'air. Alors on met le diamant dans le panier d'argent, et aux 23gr.,8 qui sont restés sur le chapeau on ajoute ce qui est nécessaire pour l'affleurement; 0gr.,34 suffisent pour cet effet, donc 0gr.,34 représentent le poids que le diamant perd dans l'eau, et par conséquent le poids d'eau qu'il déplace (95) ou le poids d'un volume d'eau qui est égal au sien. Or, à volume égal, les densités sont entre elles comme les poids (45); donc la densité du diamant est $\frac{1,32}{0,34}$ ou 3,53.

Pour les corps plus légers que l'eau, le procédé est le même; avec cette seule différence, qu'il faut retourner le panier et l'accrocher par le fond; il n'y a rien à changer ni dans les raisonnemens ni dans les calculs. Lorsque la température n'est pas o, on fait les corrections.

203. Le flacon bouché qui sert à la recherche des densités, peut contenir environ 2 ou 3 décilitres d'eau. L'exactitude de l'expérience dépend en grande partie de la précision avec laquelle le bouchon est travaillé : il faut qu'il soit légèrement conique, bien usé à l'émeri, et parfaitement circulaire dans tout son contour, afin qu'il s'enfonce exactement de la même quantité dans toutes ses positions. Alors on procède de la manière suivante : on fait trois pesées; la première pour avoir le poids s du corps solide dont on cherche la densité, la seconde pour avoir le poids $F_e + s$ du flacon plein d'eau et du corps solide mis à côté de lui dans

le même bassin, la troisième pour avoir le poids $F_s$ du flacon et du corps solide mis dans son intérieur, et par conséquent ayant chassé un volume d'eau égal au sien. La troisième pesée retranchée de la deuxième, c'est-à-dire $F_e + S - F_s$ donne le poids du volume d'eau chassé; et puisqu'à volume égal les densités sont comme les poids (45), la densité du corps est $\frac{S}{F_e + S - F_s}$. Quand la température n'est pas o, il faut faire les corrections : ce procédé ne peut s'appliquer qu'à de petites masses; il importe peu qu'elles soient spécifiquement plus pesantes ou plus légères que l'eau.

Les corps qui sont solubles dans l'eau se pèsent dans l'alcool, dans le mercure ou dans un autre liquide de densité connue.

Les corps poreux et susceptibles de s'imbiber ont des densités variables suivant le degré d'imbibition. Il est difficile de les déterminer avec exactitude.

204. La balance hydrostatique qui nous a servi (95) à démontrer le principe d'Archimède peut nous servir aussi à trouver les densités des corps solides. Pour l'employer à cet usage, elle n'a besoin d'aucune modification. Le procédé se réduit à faire deux pesées; par la première on trouve le poids S du corps, par la seconde on trouve la perte de poids E qu'il éprouve dans l'eau; cette perte de poids est le poids du volume d'eau déplacé (95) : donc la densité est $\frac{S}{E}$. Si la température n'est pas o, on fait les corrections.

205. Nous avons rassemblé dans le tableau suivant les densités les plus authentiques et auxquelles on est obligé de recourir le plus souvent; elles ont été déterminées par l'un ou l'autre des trois procédés dont nous venons de parler.

*Table de la densité des corps solides à 0 de température, en prenant pour unité la densité de l'eau.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Platine écroui | 23,0000 | Saphir du Brésil | 3,9941 |
| Platine laminé | 22,6690 | Topaze de Saxe | 3,5640 |
| Platine passé à la filière | 21,0417 | Béryl oriental | 3,5489 |
| Platine forgé | 20,3376 | | |
| Platine purifié | 19,5000 | Diamans les plus lourds (légèrement colorés en rose) | 3,5310 |
| Or... forgé | 19,3617 | — les plus légers | 3,5010 |
| Or... fondu | 19,2581 | Flint-glass (anglais) | 3,3293 |
| Iridium | 18,600 | Spath fluor (rouge) | 3,2911 |
| Tungstène | 17,6000 | Tourmaline (verte) | 3,1555 |
| Mercure à 0° | 13,5980 | Asbeste roide | 2,9058 |
| Plomb fondu | 11,3523 | | |
| Palladium | 11,3000 | Marbre de Paros (chaux carbonatée lassellaire) | 2,8376 |
| Rhodium | 11,0000 | Quartz jaspe-onyx | 2,8160 |
| Argent fondu | 10,4743 | Emeraude verte | 2,7755 |
| Bismuth fondu | 9,8220 | Perles | 2,7500 |
| Cuivre en fil | 8,8785 | | |
| Cadmium | 8,694 | Chaux carbonatée cristallisée | 2,7182 |
| Molybdène | 8,6110 | Quartz jaspe | 2,7101 |
| Laiton | 8,395 | Corail | 2,6800 |
| Arsenic | 8,3080 | Cristal de roche pur | 2,6530 |
| Nickel fondu | 8,2790 | Quartz agate | 2,6150 |
| Urane | 8,1000 | Feld-spath limpide | 2,5744 |
| Acier non écroui | 7,8163 | Verre de Saint-Gobain | 2,4882 |
| Cobalt fondu | 7,8119 | Porcelaine de la Chine | 2,3847 |
| Fer en barre | 7,7880 | Chaux sulfatée cristallisée | 2,3117 |
| Étain fondu | 7,2914 | Porcelaine de Sèvres | 2,1457 |
| Fer fondu | 7,2070 | Soufre natif | 2,0332 |
| Zinc fondu | 6,8610 | Ivoire | 1,9170 |
| Manganèse | 6,85 | Albâtre | 1,8740 |
| Antimoine fondu | 6,7120 | Anthracite | 1,8000 |
| Tellure | 6,1150 | Phosphore | 1,770 |
| Chrôme | 5,9000 | Alun | 1,7200 |
| Iode | 4,9480 | Houille compacte | 1,3292 |
| Spath pesant | 4,4300 | Jayet | 1,2590 |
| Jargon de Ceylan | 4,4161 | Succin | 1,078 |
| Gelenium | 4,320 | Sodium | 0,9726 |
| Rubis oriental | 4,2833 | Potassium | 0,8651 |
| Saphir oriental | 4,2833 | Bois de hêtre | 0,8520 |
| Topaze orientale | 4,0106 | Frêne | 0,7450 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| If. . . . . . . . . . . . . . . | 0,8070 | Bois de cyprès. . . . . . . | 0,5980 |
| Bois d'orme . . . . . . . . . | 0,8000 | Bois de cèdre . . . . . . . | 0,5610 |
| Pommier . . . . . . . . . | 0,7330 | Peuplier blanc d'Espagne . | 0,5290 |
| Bois d'oranger. . . . . . . | 0,7050 | Bois de sassafras . . . . . | 0,4820 |
| Sapin jaune . . . . . . . . . | 0,6570 | Peuplier ordinaire. . . . . | 0,3830 |
| Glace. . . . . . . . . . . . . | 0,9300 | Liége . . . . . . . . . . . . | 0,2400 |
| Tilleul. . . . . . . . . . . | 0,6040 | | |

206. *Observations.*—On voit, par l'exemple du platine et de l'or, qu'une même substance, au même état de pureté et à la même température, peut avoir des densités très-sensiblement différentes. La pression subite du balancier fait dans le métal des monnaies et des médailles le même effet que les coups répétés du marteau sur le platine, l'or et le fer; par ces effets mécaniques, les molécules se rapprochent, le métal s'écrouit, et sa densité augmente. Il paraît résulter de quelques expériences de M. Perkins que, sous des pressions de mille ou deux mille atmosphères, plusieurs corps solides, après s'être comprimés peu à peu, se réduisent en poudre impalpable, comme si leurs molécules, rapprochées à un certain degré, n'avaient plus assez de force répulsive pour se maintenir à la distance qui constitue l'état solide. Ainsi on peut conclure, par analogie, qu'il y a pour chaque substance une limite de densité qu'il est impossible de dépasser, quelque effort que l'on fasse pour porter les molécules à un plus grand degré de rapprochement.

On sait que la plupart des substances minéralogiques peuvent se présenter sous des aspects très-différens. La chaux carbonatée, par exemple, peut être à l'état de cristal régulier et transparent comme le verre, elle peut être à l'état de calcaire grossier, et, entre ces deux extrêmes, elle peut prendre des états d'agrégation très-variés, dont on peut juger par les nuances qui distinguent les marbres de différentes espèces. Or dans tous ces états la densité de la chaux carbonatée est loin d'être la même ; et ce qui est digne de remarque, c'est que l'état cristallin le plus trans-

parent et le plus parfait paraît être aussi celui qui donne la plus grande densité.

Les substances végétales ont des densités très-variables, suivant leur âge, suivant le climat où elles naissent, et suivant la nature du sol qui les produit. Dans un même individu, les différentes couches, quoique composées sensiblement de la même manière, ont des densités différentes ; les couches du centre sont toujours plus légères que les couches extérieures, soit à cause des nombreux vaisseaux qui s'y trouvent, soit à cause d'une texture particulière des fibres.

---

## CHAPITRE VII.

*Des Echelles thermométriques. — Des Thermomètres de differentes espèces et des Pyromètres.*

207. Le thermomètre peut remplir des objets très-différens : premièrement, il peut servir à déterminer les températures auxquelles se manifestent les divers phénomènes dépendans de la chaleur ; secondement, il peut servir à évaluer numériquement ces températures, à les comparer entre elles comme on compare toutes les grandeurs, et à déduire de ces rapports les lois générales de la cause elle-même qui produit les phénomènes. Si l'on ne voulait atteindre que le premier objet, toute substance serait bonne pour la construction du thermomètre et toute division serait bonne pour sa graduation : il suffirait de s'entendre ; il suffirait que les observateurs de tous les pays voulussent bien choisir la même substance et adopter la même graduation. On pourrait même se dispenser d'employer des nombres pour marquer les degrés, car les nombres représenteraient alors des signes et non pas des grandeurs, et il serait tout aussi commode d'employer d'autres signes convenus, tels, par exemples, que les lettres de l'alphabet ou les notes de la musique, ou quelque autre signe bizarre imaginé à plaisir. Le sommet de la colonne thermométrique parcourrait les divers signes marqués sur la tige du thermomètre comme le soleil parcourt les signes du zodiaque ; et pour caractériser un phénomène il suffirait de marquer le point où la colonne se trouve, à l'instant où ce phénomène se produit. Mais lorqu'on veut atteindre le second objet, lorsqu'on

veut comparer les températures pour saisir les lois de leurs périodes ou de leurs accroissemens, il faut de toute nécessité que les températures soient exprimées par des grandeurs ou par des nombres; car nous ne pouvons comparer exactement que des grandeurs ou des nombres. Or, en adoptant le mode de graduation dont nous avons parlé (153), il est évident que le nombre qui exprime une température dépend du choix de la substance dont se compose le thermomètre; ainsi nous avons vu (163) que, le thermomètre à mercure marquant 200°, le thermomètre à air marque 197°,05. Et comme nous avons démontré (179) que toutes les substances solides ou liquides se dilatent irrégulièrement par rapport au thermomètre à air, et irrégulièrement entre elles, il en résulte que là où le thermomètre à air marquerait, par exemple, 300°, chaque substance marquerait un nombre différent: le thermomètre de verre marquerait 353, celui de fer 373, celui de cuivre 329, et celui de platine 312. Le tableau suivant renferme des comparaisons qui ont été faites par Deluc sur des thermomètres construits avec des liquides différens; elles ne s'étendent pas au dessus de 100°, mais dans ces limites les différences sont cependant si considérables qu'elles feront mieux sentir encore combien les valeurs numériques des températures dépendent du choix des substances.

*Marche comparative des thermomètres construits avec différens liquides.*

| Mercure. | Huile d'olive. | Huile essentielle de camomille. | Huile essentielle de serpolet. | Eau saturée de muriate de soude. | Alcool très-rectifié. | Une partie d'alcool et une partie d'eau. | Une partie d'alcool et trois parties d'eau. | Eau. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 80 | 80,0 | 80,0 | 80,0 | 80,0 | 80,0 | 80,0 | 80,0 | 80,0 |
| 75 | 74,6 | 74,7 | 74,3 | 74,1 | 73,8 | 73,2 | 71,6 | 71,0 |
| 70 | 69,4 | 69,5 | 68,8 | 68,4 | 67,8 | 66,2 | 62,9 | 62,0 |
| 65 | 64,4 | 64,3 | 63,5 | 62,6 | 61,9 | 60,6 | 55,2 | 53,5 |
| 60 | 59,3 | 59,1 | 58,3 | 57,1 | 56,2 | 54,8 | 47,7 | 45,8 |
| 55 | 54,2 | 53,9 | 53,3 | 51,7 | 50,7 | 49,1 | 40,6 | 38,5 |
| 40 | 49,2 | 48,8 | 48,3 | 46,6 | 45,3 | 43,6 | 34,4 | 32,0 |
| 45 | 44,0 | 43,6 | 43,4 | 41,2 | 40,2 | 38,4 | 28,4 | 26,1 |
| 40 | 39,2 | 38,6 | 38,4 | 36,3 | 35,1 | 33,3 | 23,0 | 20,5 |
| 35 | 34,2 | 33,6 | 33,5 | 31,3 | 30,3 | 28,4 | 18,0 | 15,9 |
| 30 | 29,3 | 28,7 | 28,6 | 26,5 | 25,6 | 23,9 | 13,5 | 11,2 |
| 25 | 24,3 | 23,8 | 23,8 | 21,9 | 21,0 | 19,4 | 9,4 | 7,3 |
| 20 | 19,3 | 18,9 | 19,0 | 17,3 | 16,5 | 15,3 | 6,1 | 4,1 |
| 15 | 14,4 | 14,1 | 14,2 | 12,8 | 12,2 | 11,1 | 3,4 | 1,6 |
| 10 | 9,5 | 9,3 | 9,4 | 8,4 | 7,9 | 7,1 | 1,5 | 0,2 |
| 5 | 4,7 | 4,6 | 4,7 | 4,2 | 3,9 | 3,4 | 0,1 | —0,4 |
| 0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| — 5 | | | | — 4,1 | — 3,9 | | | |
| —10 | | | | — 8,0 | — 7,7 | | | |

La première colonne indique les degrés du thermomètre à mercure, d'après la division de *Réaumur*, l'intervalle entre la glace fondante et l'eau bouillante étant divisé en 80 parties seulement.

Les colonnes suivantes indiquent les degrés que marquent les autres thermomètres gradués de la même manière. Par exemple, le thermomètre à mercure marquant 20°, les autres marquent 19,3; 18,9; 19,0; 17,3; 16,5; 15,3; 6,1 ; 4,1. On peut juger par là de la discordance qui existe entre les instrumens composés de substances différentes.

Il est donc bien démontré que, pour découvrir des rapports simples entre les diverses températures auxquelles se produisent les phénomènes de même nature ou les diverses périodes d'un phénomène, il importe de construire le thermomètre avec telle substance plutôt qu'avec telle autre substance.

208. *Thermomètre à air.* — Les belles découvertes de MM. Dulong et Petit, dont nous parlerons un peu plus loin, ne laissent aucune incertitude sur l'espèce de substance que l'on doit choisir préférablement à toute autre; elles démontrent que le thermomètre à air ou à gaz conduit à des lois générales très-remarquables, et qu'il serait impossible d'arriver à ces lois, ou même de les exprimer en mesurant les températures avec des thermomètres d'une autre espèce.

209. *Thermomètre à mercure.* —Cependant les diverses dispositions que l'on peut donner au thermomètre à air, n'étant pas d'un usage commode, on emploie de préférence le thermomètre à mercure; on peut l'employer en toute sûreté depuis — 36° jusqu'à 100°, puisque dans ces limites il marche parfaitement d'accord avec le thermomètre à air (163); mais lorsque les températures sont plus hautes que 100° ou plus basses que — 36, il faut faire un calcul pour ramener les indications du thermomètre à mercure au nombre que donnerait le thermomètre à air auquel il faut toujours revenir comme à un type fondamental.

210. *Thermomètre à esprit de vin.* —Les thermomètres à esprit de vin, dont on fait un grand usage dans les observations météorologiques, ont l'avantage de descendre à des températures plus basses que les thermomètres à mercure, car il n'y a point de froid assez vif pour geler l'alcool rectifié; et en outre ils ont l'avantage, dans ces degrés inférieurs, de s'accorder assez bien avec le thermomètre à air, Cependant pour des recherches exactes il ne

faudrait employer le thermomètre à alcool au dessous de o qu'après s'être assuré de sa marche, comme MM. Dulong et Petit se sont assurés de la marche du thermomètre à mercure; et au dessus de o le thermomètre à esprit de vin est sensiblement en défaut, comme on en peut juger par la table précédente (207). Aussi toutes les fois que l'on donne des températures déterminées par ce thermomètre, il est nécessaire d'en prévenir.

211. Les thermomètres que l'on pourrait construire avec d'autres substances liquides donneraient des évaluations numériques de température qui ne pourraient servir de base à aucun calcul, à moins que l'on n'ait déterminé d'avance leur marche comparative pour substituer aux degrés qu'ils marquent les degrés que marquerait le thermomètre à air.

212. *Echelles thermomètriques.* — Nous avons déjà dit (153) que les points fixes, généralement adoptés pour la graduation des thermomètres, sont celui de la glace fondante et celui de l'eau bouillante; mais l'intervalle compris entre ces points n'est pas toujours divisé de la même manière. Il y a trois modes de division qui donnent trois *échelles thermomètriques* différentes, ou si l'on veut, trois espèces de thermomètre : le *thermomètre centigrade* et le *thermomètre de Réaumur*, qui sont en usage en France, et le *thermomètre de Fahrenheit*, qui est en usage en Angleterre.

| | | |
|---|---|---|
| Pour le thermomètre | | |
| centigrade on marque | o à la glace et | 100° à l'ébullition, |
| de Réaumur. . . . . | o. . . . . . . . | 80 |
| de Fahrenheit. . . . | 32. . . . . . . . | 212 |

Avec ces données il est facile de convertir les degrés de Réaumur et de Fahrenheit en degrés centigrades.

Puisque 80 R valent $100^\circ c.$

$1^\circ$ R vaut $\frac{5}{4}$ $c.$

Donc il suffit de multiplier par $\frac{5}{4}$ les degrés de Réaumur pour en faire des degrés centigrades ; et réciproquement en multipliant par $\frac{4}{5}$ les degrés centigrades on en fera des degrés de Réaumur.

Puisque 180 F valent 100° *c*.
1° F vaut $\frac{5}{9}$ *c*.

Donc, une température en degrés de Fahrenheit étant donnée, il faut en retrancher 32, et multiplier le résultat par $\frac{5}{9}$ pour en faire des degrés centigrades.

213. *Thermomètre à maximum de M. Gay-Lussac.* — On appelle en général thermomètres à maximum, ceux qui peuvent conserver la marque des plus hautes et des plus basses températures qu'ils ont éprouvées pendant une période de temps quelconque. Ainsi un instrument de cette espèce étant abandonné à lui-même et exposé à l'action des causes extérieures pendant un jour, ou même pendant un mois ou une année, on pourra savoir, en l'observant après ce laps de temps, quel est le point le plus haut où il s'est élevé et le point le plus bas où il est descendu. Le thermomètre à maximum de M. Gay-Lussac est représenté *figure* 176; il se compose d'un ballon *b*, dont le col *cc* a été fermé à la lampe, et ensuite percé en son sommet d'une petite ouverture *v* extrêmement capillaire, et dont les parois doivent être très-minces. Autour du col du ballon, et à sa partie inférieure, on mastique un large tube *tt*; le ballon et la tube étant remplis d'eau ou d'alcool à une température donnée, on verse du mercure qui gagne le fond du tube et qui s'élève jusqu'au niveau *n*, mais qui ne pénètre pas dans le ballon à cause de la petitesse de l'ouverture *v*. Cela posé, si la température s'abaisse, il se fait un vide dans le ballon, la pression extérieure y pousse du mercure pour le remplir, et quand tout l'effet est produit, on renverse l'appareil avec précaution, on fait sortir le mercure en chauffant un peu la boule, et on le jauge en le versant

dans un tube qui est gradué pour cet usage. Le nombre des divisions que le mercure occupe dans ce tube à une température donnée, indique, au moyen d'une table dressée d'avance, quelle variation de température a dû supporter la boule.

Si la température s'élève au lieu de s'abaisser, le liquide sort du ballon, et le mercure n'y entre pas; mais alors on ramène l'appareil à sa température primitive, et par la quantité de mercure qui pénètre dans la boule pendant ce refroidissement, on juge du degré de chaleur auquel elle a dû être portée.

214. *Thermomètre à maximum de Rutherford.* — Il se compose de deux thermomètres, recourbés et ajustés sur la même monture (*Fig.* 190); le liquide du premier *bmt* est du mercure, le liquide du second *bat* est de l'alcool coloré en rouge avec du carmin. Les tiges *mt* et *at* doivent être horizontales quand l'instrument est en expérience; pour cela la monture tourne au moyen d'une charnière *c* autour de son pied, dont on n'a représenté qu'une partie.

Dans l'intérieur du thermomètre à mercure est un petit cylindre *f* en fer ou en acier qui sert d'index et qui peut couler dans la partie vide du tube sans éprouver trop de frottement. Quand la température s'élève, l'index est poussé par la colonne de mercure, et quand elle s'abaisse, l'index reste en place, car le mercure ne saurait l'entraîner dans sa retraite; ainsi la position de l'index de fer marque la plus haute température à laquelle l'instrument soit arrivé, c'est-à-dire le *maximum* qu'il ait pu atteindre.

Dans l'intérieur du thermomètre à alcool est un petit cylindre d'émail servant aussi d'index et coulant librement sans toucher les parois et sans faire piston; le liquide passe sans le pousser. Supposons, par exemple, que l'index d'émail soit au sommet de la colonne d'alcool et dans son intérieur, il est visible que, si la température s'abaisse,

l'index est pressé par le sommet de la colonne liquide, et se trouve forcé de le suivre dans tout son mouvement rétrograde; mais à l'instant où la température redevient croissante, le liquide passe autour de l'index sans le pousser, le sommet de la colonne s'éloigne; et l'index reste en place pour marquer la plus basse température à laquelle l'instrument soit arrivé, c'est-dire le *minimum*. Ainsi le thermomètre à mercure indique les *maximum*, et le thermomètre à alcool les *minimum*. Chacun d'eux a son échelle, graduée comme à l'ordinaire. Pour mettre l'instrument en expérience on le relève d'abord verticalement, et l'on donne quelques légères secousses pour faire tomber les index : celui de fer vient reposer sur le sommet de la colonne de mercure, et celui d'émail sur le sommet de la colonne d'alcool; le premier reste toujours au dehors du liquide, le second, toujours au dedans : cela fait, on lui donne la position horizontale, qui est la seule dans laquelle il puisse donner des indications sûres.

215. *Thermomètre à maximum de Bellani.* — Il se compose d'un réservoir d'alcool, d'une colonne recourbée de mercure, et de deux cylindres de fer enveloppés de verre, qui servent d'index (*Fig.* 179 *et* 180); l'alcool remplit tout le réservoir R et une partie du tube jusqu'en $m$; la colonne de mercure descend jusqu'à la courbure inférieure $i$, et se relève jusqu'en $m'$; au dessus de $m'$ se trouve une autre colonne d'alcool, qui remplit en partie le petit réservoir $r$; un des index est représenté de grandeur naturelle dans la *figure* 180; la petite enveloppe du cylindre de fer est aplatie à l'extrémité $p$, par laquelle elle repose sur le mercure, et un cheveu $bc$ forme une boucle élastique, qui presse les parois du tube, et qui est capable de retenir l'index, quand il est simplement flottant dans la colonne d'alcool; mais quand l'index est poussé par le mercure, l'élasticité du cheveu ne l'empêche pas de marcher, et c'est ainsi qu'il marche ou qu'il reste en repos, suivant

que le mercure le pousse ou l'abandonne. Lorsqu'on veut mettre l'appareil en expérience, on fait descendre les index sur le mercure, au moyen d'un aimant. On voit dans la *figure* 179 que l'index *b* est destiné à marquer les plus basses températures ou les minimum, et l'index *h* les hautes températures ou les maximum.

216. *Thermomètre à maximum de Six.* — C'est à Six que nous devons la première invention du thermomètre précédent; Bellani lui a seulement fait subir quelques changemens; il l'a réduit à deux branches, au lieu de trois, en agrandissant le réservoir R; il a enveloppé les cylindres de fer, et il a mis le cheveu en boucle, au lieu de le mettre droit, comme faisait Six.

217. *Thermomètres métalliques.* — On a essayé une foule de combinaisons et de dispositions différentes, pour employer les divers métaux à la construction des thermomètres; mais de tous les thermomètres métalliques qui reposent sur la dilatation d'un seul métal, l'usage n'en a conservé aucun qui mérite une description particulière. Il n'en est pas de même des thermomètres qui reposent sur l'inégale dilatation de deux ou de plusieurs métaux; ils peuvent offrir de grands avantages, soit dans les observations ordinaires, soit dans des recherches délicates, et nous pensons qu'il est nécessaire de faire connaître au moins les deux suivans.

218. *Themomètre à cadran.* — La *figure* 207 représente une des dispositions que l'on donne habituellement aux thermomètres de cette espèce. *fgh* est une lame à peu près semblable aux lames de compensation (183); elle se compose d'une petite bande de cuivre et d'une petite bande d'acier, clouées ou soudées ensemble dans toute leur longueur. Cette lame binaire est fixée en *f*; elle se recourbe en *g*, et elle se termine en *h*. Autour de l'axe *b* tourne un levier, dont le petit bras est sans cesse appuyé contre l'extrémité *h*, et dont le grand bras porte des dents *dd'*.

Les mouvemens très-petits que la dilatation peut produire à l'extrémité *h* sont déjà amplifiés dans le même rapport que les bras de levier; ensuite les dents *dd'* engrènent dans un petit pignon, qui tourne autour de l'axe central *c*, et l'aiguille *li*, tournant autour du même axe, amplifie encore les mouvemens du pignon. On calcule les dimensions pour que les 100° du thermomètre de centigrade correspondent à peu près à une révolution entière de l'aiguille. Les instrumens de cette espèce doivent être gradués sur le thermomètre à mercure, de degré en degré, ou au moins de 10° en 10°.

219. *Thermomètre de Breguet.* — Cet instrument est le plus délicat et le plus commode de tous les thermomètres métalliques; il se compose d'un petit ruban de métal, de 1 à 2 millimètres de largeur, qui est roulé en spire, comme le représente la *figure* 177; la spire est attachée par son sommet à une pièce de cuivre, qui la laisse parfaitement libre et isolée, et, à son extrémité inférieure, elle porte une aiguille horizontale très-légère, dont la pointe parcourt la circonférence du cercle divisé *cc'*; le cercle est évidé, et repose sur trois pieds très-minces, afin que l'air puisse circuler aisément entre tous les tours de la spire. Une cloche recouvre l'appareil, pour le garantir de l'agitation extérieure.

Le ruban de la spire est composé de trois couches métalliques superposées, argent, or et platine; la couche d'or, qui est au milieu, sert à souder les deux autres; ce système a d'abord une épaisseur sensible; mais on le lamine jnsqu'à le réduire à une épaisseur totale de $\frac{1}{50}$ de millimètre; on peut juger par là de la masse excessivement petite de l'instrument, et par conséquent de la rapidité avec laquelle il prend la température de l'air qui le touche.

Par l'inégale dilatation du platine et de l'argent, la spire se tord ou se détord, quand la température s'élève

on s'abaisse, et l'aiguille marche pour obéir à ces mouvemens. On gradue cet instrument en comparant sa marche à celle d'un thermomètre à mercure très-sensible.

220. *Pyromètres métalliques.* — On nomme pyromètres les instrumens qui sont destinés à mesurer les *hautes températures*, et en général on appelle hautes températures celles qui sont supérieures au point d'ébullition du mercure. On a fait des essais sans nombre pour construire des pyromètres avec les métaux; mais tous ces instrumens ont deux grands inconvéniens: d'abord ils ne reviennent pas exactement au même point pour le même degré de chaleur, parce que les pièces se tourmentent au feu, et ensuite il n'y a aucun rapport certain entre leurs indications et les indications du thermomètre centigrade.

Cependant il peuvent être utiles dans les applications des arts, où l'on ne cherche pas à obtenir des évaluations numériques de températures, mais seulement à produire des degrés de chaleur déterminés, tantôt plus forts ou plus faibles, suivant les effets que l'on veut obtenir. Le pyromètre qui paraît le plus commode pour cet usage est représenté *figure* 178; il se compose d'une plaque ou d'un tourteau d'argile, sillonné dans sa longueur par une rainure un peu profonde, et d'une règle de fer ou de platine, placée de champ dans la rainure; la règle s'appuie d'une part contre un talon fixe, et de l'autre elle presse le petit bras d'un levier coudé dont le grand bras fait l'office d'aiguille et parcourt un arc divisé. Le talon fixe et l'axe de rotation du levier étant portés l'un et l'autre par le tourteau d'argile, qui se dilate moins que le métal, on voit que l'aiguille doit prendre diverses positions, suivant les divers degrés de chaleur; mais lorsqu'on essaie d'évaluer les résultats en degrés centigrades, les nombres que l'on donne sont tout-à-fait illusoires, et n'ont sans doute aucun rapport avec la vérité.

221. *Pyromètre de Wedgewood.* — Cet instrument

repose sur une propriété chimique très-remarquable, dont jouissent à divers degrés les argiles de différentes espèces. L'argile ayant été pulvérisée, malaxée et séchée dans une étuve, à la température de 100°, si on l'expose ensuite à de hautes températures, on observe qu'elle se retire sur elle-même, et diminue de volume à mesure que la température s'élève. Cette *retraite*, ou, comme on dit aujourd'hui, ce *retrait* n'est pas une propriété passagère; l'argile qui l'a éprouvé n'est plus susceptible de revenir à son état ni à ses dimensions primitives, et plus la température s'élève, plus le retrait est considérable. Supposons donc que l'on ait un grand nombre de petits cylindres, qui soient tous de la même espèce d'argile, tous préparés de la même manière, et tous exactement de la même grandeur et de la même forme; il est évident que, si l'on en prend plusieurs, qu'on les expose chacun à une température particulière, il suffira de les mesurer ensuite pour connaître celles de ces températures qui sont les plus hautes et celles qui sont les plus basses; car les températures seront d'autant plus hautes que le retrait sera plus considérable. C'est sur ce principe qu'est fondé le pyromètre de Wedgewood. Pour mesurer commodément les cylindres d'argile qui ont éprouvé le retrait, on les fait passer dans une rainure formée par deux règles de cuivre ou de laiton, légèrement inclinées l'une à l'autre (*Fig.* 181). Les deux règles et la plaque sur laquelle elles sont fixées s'appellent la *jauge*; on leur donne 609mm de longueur, et l'on a coutume de les couper en deux parties repliées l'une sur l'autre, pour rendre l'appareil plus portatif. Sur la longueur totale on fait 240 divisions, que l'on appelle *degrés du thermomètre de Wedgewood*. Au sortir de l'étuve à 100°, chaque petit cylindre est juste de grandeur pour se tenir à l'entrée de la rainure.

Les figures 182 et 183 représentent la coupe et le plan d'un petit étui d'argile dans lequel on fait ordinairement chauffer les petits cylindres.

Pour graduer l'instrument et comparer ses indications à celles du thermomètre centigrade, il faudrait d'avance connaître la température qui est nécessaire pour réduire les petits cylindres au point de les faire aboutir aux divisions successives. Mais jusqu'à présent on ne connaît aucun moyen d'arriver à ces résultats. C'est par des hypothèses tout-à-fait gratuites que l'on établit ces rapports, et lorsqu'on dit que 1° du pyromètre de Wedgewood vaut 72° centigrades, on exprime une convention plutôt qu'une vérité.

FIN DE LA PEMIÈRE PARTIE.

# DEUXIÈME PARTIE.

## *Changemens d'état des Corps.*

### CHAPITRE PREMIER.

#### *De la Fusion et de la Solidification.*

222. *Fusion.* — Il est facile de reconnaître que la *fusion* ou le passage de l'état solide à l'état liquide est un phénomène produit par la chaleur, et qu'aucune autre cause dans la nature ne peut déterminer les corps à ce changement d'état : la glace peut être brisée ou réduite en poussière, elle peut être soumise à toutes les puissances mécaniques et à tous les agens naturels, sans cesser d'être un corps solide, à moins que la chaleur ne vienne exercer sur elle son action pour la convertir en eau. Il en est de même de la cire, et lorsqu'on la voit fondre aux rayons du soleil, on sait bien que c'est par l'effet de la chaleur qu'elle entre en fusion, et non par l'effet de la lumière; et si le plomb peut se liquéfier et devenir coulant, lorsqu'on le bat sur une enclume à coups redoublés, c'est que la compression et la percussion dégagent de la chaleur tout-à-fait semblable à la chaleur d'un foyer. Ainsi, l'état de solidité ou de fluidité d'un corps est un état relatif, dépendant uniquement de la température à laquelle ce corps est soumis. A une autre distance du soleil, la terre prendrait une autre consistance

et un autre aspect : si elle en était plus voisine, les métaux seraient pour la plupart dans un état habituel de fusion, et les profondeurs de la mer, au lieu d'être remplies d'eau, pourraient bien être remplies de substances métalliques liquéfiées ; au contraire, si elle en était plus éloignée, la mer serait une masse solide, il n'y aurait plus d'eau coulante et probablement plus de liquide en circulation pour produire les phénomènes organiques de la végétation et de la vie.

La chaleur pénétrant et dilatant tous les corps, il est curieux de chercher si elle peut pareillement les faire passer tous sans exception de l'état solide à l'état liquide. Or, en examinant sous ce point de vue tous les corps solides, on trouve entre eux de grandes différences : il y en a qui sont très-*fusibles* et qui ne peuvent soutenir des températures même très-basses sans passer à l'état liquide ; tels sont la glace, le phosphore, le soufre, la cire, les corps gras et les résines ; il y en a d'autres qui exigent, pour se fondre, des températures un peu plus élevées, comme l'étain, le plomb et divers alliages ; enfin il y en a qui ne peuvent entrer en fusion que par des feux long-temps soutenus et aux plus hautes températures que nous soyons capables de produire ; l'or, l'acier, le fer et le platine sont dans ce cas. Les corps qui résistent à ces plus hauts degrés de chaleur sont appelés *infusibles*, *fixes* ou *réfractaires* ; et comme nos moyens de développer de la chaleur se perfectionnent de jour en jour, le nombre des substances infusibles a été sans cesse en diminuant. Le charbon paraît être le plus réfractaire de tous les corps : cependant plusieurs physiciens prétendent avoir observé quelques traces de fusion sur les arêtes des diamans qu'ils soumettaient à l'essai. En attendant que ce résultat soit constaté, on peut du moins conclure par analogie qu'il n'y a pas de corps essentiellement infusibles.

Les substances organiques, étant en général composées de

carbone et d'élémens gazeux plus ou moins volatils, se décomposent souvent par l'action du feu plutôt que de se liquéfier. Le bois, fortement chauffé, se carbonise et ne se fond pas; il en est de même des fruits, des fleurs et des autres tissus végétaux; il en est de même encore des fibres musculaires et de tous les autres tissus des corps vivans. Toutes ces substances organiques se décomposent par la chaleur; les produits volatils s'exhalent, et il ne reste en dernier résultat que le charbon et les autres élémens fixes qui leur servent de bases.

Plusieurs corps inorganiques se décomposent aussi avant de se fondre, et il a fallu l'esprit inventif de Hall pour démontrer leur fusibilité. Son procédé consiste à chauffer ces corps en les maintenant sous une haute pression, de telle sorte que les élémens les plus volatils ne puissent pas s'exhaler. C'est ainsi que Hall a fait fondre du marbre, sans qu'il se convertît en chaux, et qu'il a démontré pareillement la fusibilité d'un grand nombre de substances volcaniques. Ces résultats sont importans pour discuter l'origine et la formation des diverses couches dont se compose la terre.

223. *Conditions de la fusion.* — Lorsque les corps passent de l'état solide à l'état liquide, ils présentent deux phénomènes singuliers (144 et 145); premièrement, ils restent solides jusqu'à ce qu'ils soient arrivés à une certaine température *fixe*, qui est toujours la même pour le même corps, et c'est alors seulement que la fusion peut commencer; secondement, ils restent à la même température pendant toute la durée de la fusion, quelle que soit la quantité de calorique qu'on leur fournisse; d'où il suit qu'ils absorbent ce calorique pour se fondre, et qu'ils le cachent dans leur intérieur, sans en laisser rien paraître au dehors. Ainsi, *la fixité de température*, et *l'absorption du calorique latent* sont les *deux conditions* essentielles de la fusion. Ces phénomènes peuvent être facilement constatés sur les corps

très-fusibles, dont la température est accessible au thermomètre à mercure, et ils peuvent l'être encore sur les substances peu fusibles, dont on obtient des masses liquides assez considérables pour y plonger quelques-uns des pyromètres dont nous avons parlé. Il y avait près de cent ans que le thermomètre était inventé, que l'on ne connaissait pas encore, d'une manière certaine, l'invariabilité du point de fusion des corps; on croyait que la glace, par exemple, devait entrer en fusion à diverses températures, suivant la latitude ou l'élévation des lieux où elle était formée. La première condition de la fusion une fois démontrée, il fallut encore plus d'un demi-siècle pour constater l'autre, c'est-à-dire l'absorption du calorique latent; car ce fut en 1763 que Black mit cette vérité fondamentale dans tout son jour, et qu'il en fit voir les importantes conséquences. Il est visible que la quantité de calorique latent que prend un corps pour se fondre est proportionnelle à la masse de ce corps qui entre en fusion, et nous verrons plus loin qu'à masse égale, des corps différens prennent des quantités de calorique latent très-différentes; ce qui suffit pour imprimer à chaque substance un caractère distinctif pareil à celui qui dérive de la densité ou des autres qualités primitives de la matière.

L'affinité chimique est cependant une cause qui peut faire changer le point de fusion des corps, mais il ne paraît pas qu'elle puisse modifier en rien l'absorption du calorique latent : ainsi, la neige ou la glace pilée étant, par exemple, à la température de — 10° et en contact avec du sel ordinaire aussi à — 10°, la fusion s'opère par la combinaison de ces deux corps, et la température s'abaisse de plus en plus; ce qui est une preuve évidente de l'absorption du calorique latent. C'est là le principe de la formation des *mélanges frigorifiques* dont nous nous occuperons plus tard. Dans les combinaisons de cette espèce, la limite du froid que l'on peut produire est déterminée par la température à

laquelle les élémens de la combinaison cessent d'agir l'un sur l'autre. La neige et le sel, par exemple, n'ayant plus d'action sensible à 18 ou 20° au dessous de 0, il est impossible d'obtenir avec ces élémens un froid plus grand que — 18 ou—20°, puisqu'au delà de ce terme ils cessent de se combiner; et pour approcher de cette limite autant qu'il est possible, il faut que le calorique latent soit exclusivement fourni par la portion des élémens qui entrent en combinaison.

Ce qui arrive dans les mélanges frigorifiques se reproduit avec quelques modifications dans plusieurs procédés des arts, comme dans l'extraction des métaux, dans la fabrication du verre, et aussi dans les nombreux essais que l'on peut faire au chalumeau, pour la détermination chimique ou minéralogique de diverses substances. On emploie alors ce qu'on appelle *fondans*, c'est-à-dire des corps qui ont la propriété d'accélérer la fusion des matières avec lesquelles ils sont en contact, à peu près comme le sel accélère la fusion de la glace ou de la neige. Le composé qui en résulte étant beaucoup plus fusible que n'est la substance à laquelle on ajoute le fondant, on peut en tirer parti plus facilement : tantôt on le destine à d'autres combinaisons chimiques, comme il arrive à la mine de fer, qui entre en fusion par le fondant et ensuite se désoxide et se carbonise pour se transformer en fonte; tantôt on le travaille immédiatement, comme le verre tantôt; on observe les nuances de sa couleur pour juger par là des élémens chimiques qui le constituent. M. Dobereiner a démontré, par exemple, qu'en mêlant 207 grammes de plomb, 118 d'étain, 284 de bismusth et 1617 de mercure, à la température de 17° le thermomètre descend de suite à—10°.

Un grand nombre de physiciens ont pris soin de déterminer les points de fusion des différens corps, et nous avons rassemblé, dans le tableau suivant, ceux de ces points de fusion qui sont les mieux constatés et qui paraissent être

d'un usage plus fréquent. Nous avons déjà prévenu qu'il est impossible d'évaluer avec quelque confiance les degrés du pyromètre de Wedgewood en degrés centigrades.

*Table des points de fusion de différentes substances, en degrés du pyromètre de Vedgewood et en degrés du thermomètre centigrade.*

| NOMS DES SUBSTANCES. | Degrés du pyrom. | Degrés centésimaux. | NOMS DES SUBSTANCES. | Degrés du pyrom. | Degrés centésimaux. |
|---|---|---|---|---|---|
| Tungstène. . . . . . | 170 | » | Alliage, 1 atome d'étain, 1 bismuth. . | » | 141,2 |
| Chrôme. . . . . . . | 170 | » | — 1 plomb, 4 étain, 5 bismuth. . . . . | » | 118,9 |
| Molybdène. . . . . | 170 | » | Soufre. . . . . . . . | » | 109 |
| Colombium. . . . . . | 170 | » | Iode. . . . . . . . . | » | 107 |
| Manganèse. . . . . . | 160 | » | 2 plomb, 3 étain, 5 bismuth. . . . . . | » | 100 |
| Nickel. . . . . . . . | 160 | » | 5 plomb, 3 étain, 8 bismuth. . . . . . | » | 100 |
| Fer. . . . . . . . . . | 130 | » | 4 bismuth, 1 plomb, 1 étain. . . . . . . | » | 94 |
| Acier. . . . . . . . . | 130 | » | Sodium. . . . . . . | » | 90 |
| Cobalt. . . . . . . . | 130 | » | Potassium. . . . . . | » | 58 |
| Or. . . . . . . . . . . | 32 | » | Phosphore. . . . . . | » | 43 |
| Cuivre. . . . . . . . | 27 | » | Acide stéarique. . . | » | 70 |
| Argent. . . . . . . . | » | 538 | Cire blanchie. . . . . | » | 68 |
| Antimoine. . . . . . | » | 432 | Cire non blanchie. . | » | 61 |
| Zinc. . . . . . . . . | » | 360 | Acide margarique. . | » | 55 à 60 |
| Plomb. . . . . . . . . | » | 334 | Stéarine. . . . . . . | » | 49 à 43 |
| Bismuth. . . . . . . | » | 256 | Spermaceti. . . . . . | » | 49 |
| Étain. . . . . . . . . | » | 230 | Acide acétique. . . . | » | 45 |
| Alliage, 5 atomes d'étain, 1 de plomb. | » | 194 | Suif. . . . . . . . . | » | 33,33 |
| — 4 étain, 1 plomb. | » | 189 | Glace. . . . . . . . . | » | 0,0 |
| — 3 étain, 1 plomb | » | 186 | Huile de térébenth. . | » | — 10 |
| — 2 étain, 1 plomb. | » | 196 | Mercure. . . . . . . | » | — 39,0 |
| — 1 étain, 1 plomb. | » | 241 | | | |
| — 1 étain, 3 plomb. | » | 289 | | | |
| — 8 étain, 1 bismuth. | » | 200 | | | |
| — 2 étain, 1 bismuth. | » | 167,7 | | | |
| — 3 étain, 1 plomb. | » | 167,7 | | | |

224. *Solidification.* — Quand les liquides passent à l'état solide, on observe en général deux conditions correspondantes à celles de la fusion : premièrement la solidification

s'opère à une température fixe, qui est celle de la fusion; secondement, tout le calorique latent, qui a été absorbé pendant la fusion, est reproduit et dégagé pendant la solidification. Il suffit d'un thermomètre ou d'un pyromètre pour démontrer la première de ces vérités; quant à la deuxième, nous ne pourrons indiquer comment on la constate par l'expérience que quand nous donnerons les moyens de mesurer les quantités de calorique latent. On sait cependant, et cette observation a été faite en 1724 par Fahrenheit, on sait que, dans certaines circonstances, l'eau pure peut être amenée jusqu'à 10 ou 12° au dessous de zéro, sans se congeler; c'est une sorte d'exception qui se présente dans quelques autres liquides et surtout dans les corps gras. Ce phénomène, qui a lieu quelquefois à l'air libre, se manifeste plus sûrement quand la surface du liquide ne supporte plus qu'une faible pression, produite par de l'air ou de la vapeur; aussi, pour l'observer, il convient d'enfermer le liquide dans des tubes que l'on scelle après y avoir fait le vide, ou de le placer sous le récipient de la machine pneumatique et ensuite de refroidir graduellement, en évitant, autant qu'il est possible, toute espèce d'agitation. Alors, après un certain degré de refroidissement, il suffit d'imprimer au liquide quelque secousse légère, ou de jeter dans sa masse quelques fragmens d'un corps solide quelconque, pour déterminer à l'instant une solidification plus ou moins complète. En même temps, le thermomètre, qui indiquait l'abaissement de température, s'élève subitement et remonte quelquefois jusqu'au terme naturel du changement d'état du corps. La rapidité de la solidification qui a eu lieu dans ces circonstances, et l'ascension du thermomètre, sont deux phénomènes faciles à expliquer : le calorique latent des premières parties qui se congèlent se porte sur les parties voisines, qui sont encore liquides; il les réchauffe, mais ne les réchauffe pas assez pour les empêcher de se congeler à leur tour; de là le double effet de la prompte solidification

et du réchauffement. Les dissolutions de sulfate de soude présentent des phénomènes analogues : les dissolutions saturés à chaud laissent peu à peu déposer le sel de soude, lorsqu'elle se refroidissent à l'air libre; mais si on les enferme dans des tubes effilés que l'on scelle à la lampe, après les avoir purgés d'air par l'ébullition, le refroidissement ne donne plus de précipité, et dès que l'on brise la pointe effilée pour laisser entrer l'air, il y a précipité presque subit et élévation de température.

Quand le retour à l'état solide se fait au degré de chaleur ordinaire, il se fait toujours lentement et sans aucune élévation de température. Par exemple, quand l'eau gèle à o, la congélation commence en général sur plusieurs points à la fois, et sur tous ces points, les premières molécules qui se gèlent donnent leur calorique latent aux molécules voisines, qui sont par là maintenues à l'état liquide pendant quelques instans de plus. C'est pourquoi on aperçoit d'abord des lames minces de glaces, ou des aiguilles très-fines, ou des filamens qui se croisent de mille manières dans la masse du liquide. A une certaine distance de ces premiers filamens, il s'en forme d'autres, et ainsi de suite jusqu'à ce que la chaleur latente se soit peu à peu dissipée et que le froid ait pu saisir successivement toutes les molécules liquides pour les réunir en une seule masse solide. Sans le calorique latent, la solidification des corps se ferait en un instant; ainsi la rapidité de la solidification dépend de l'abondance de la chaleur qui se dégage, et de la facilité avec laquelle elle peut se dissiper.

225. Une même substance liquide peut prendre, en se solidifiant, des aspects et des propriétés très-différentes. Quand le phénomène se produit lentement et sans trouble, il arrive ordinairement que la substance cristallise et qu'elle prend la plus grande densité dont elle soit susceptible. Au contraire, quand le refroidissement est prompt ou quand la masse liquide est agitée de quelque manière, les molé-

cules n'ont pas le temps de se grouper et de s'arranger, elles se précipitent brusquement et forment un solide dont toutes les parties intérieures sont dans un état plus ou moins forcé. Nous verrons, en parlant des *Actions moléculaires*, les phénomènes singuliers que présentent, sous ce point de vue, le soufre, le phosphore, le verre et plusieurs autres corps, lorsqu'ils sont subitement refroidis, à partir d'une température un peu haute, et surtout lorsqu'ils sont forcés à une brusque solidification. Cependant, que la solidification soit lente ou rapide, la plupart des corps diminuent de volume à l'instant de ce passage; tout le monde sait que l'eau éprouve un état contraire, qu'elle augmente de volume en se congelant, et M. Erman a observé un phénomène analogue dans l'alliage de 4 parties de bismuth, 1 de plomb et 1 d'étain; il se dilate en se congelant, et il a un maximum de densité à l'état solide, vers 44°.

---

## CHAPITRE II.

### *Des Vapeurs dans le vide.*

226. *Les vapeurs se forment lentement dans l'air et instantanément dans le vide.* — Lorsqu'un liquide est exposé au contact de l'air, il arrive ordinairement qu'il diminue peu à peu et qu'après un temps plus ou moins long il disparaît tout-à-fait. Ainsi, l'eau qui couvre la terre après les pluies ne résiste pas au souffle d'un vent sec ou à l'action prolongée du soleil; elle se dissipe en quelques jours, et ce n'est pas seulement parce qu'elle s'infiltre dans le sol, mais aussi parce qu'elle s'exhale dans les airs. Au reste, on en voit la preuve dans ce qui arrive à un vase plein d'eau, exposé à l'air libre ou même dans un appartement; l'eau décroît d'instant en instant, et enfin il ne reste au fond du vase que les corps étrangers qu'elle tenait en dissolution. Le même phénomène se produit avec une rapidité encore plus grande lorsqu'on fait bouillir un liquide par l'action du feu; le liquide n'est absorbé ni par le vase ni par le feu, et cependant il disparaît en quelques heures. De ces diverses observations l'on peut conclure que les liquides changent d'état, qu'ils deviennent invisibles et prennent une force expansive comme les gaz; c'est ce que l'on exprime en disant qu'ils se *vaporisent* ou se réduisent en *vapeurs*. Les corps sont d'autant plus *volatils* qu'ils se vaporisent ou qu'ils se volatilisent plus promptement et à des températures moins élevées.

On peut remarquer aussi que, dans certains cas, ce n'est pas le liquide tout entier qui passe à l'état de vapeur. Cela

arrive lorsqu'il est un mélange de plusieurs corps différens qui se peuvent séparer par l'*évaporation*; alors les parties plus volatiles s'exhalent en plus grande abondance, et ce qui reste n'est plus composé des mêmes élemens ou du moins il n'en est plus composé dans les mêmes proportions.

Pendant long-temps on a supposé que les vapeurs ne pouvaient ni se former ni subsister par elles-mêmes, mais qu'elles prenaient naissance à la surface des liquides par l'action dissolvante de l'air, et que cette même cause était encore nécessaire pour les maintenir suspendues dans l'atmosphère. Pour montrer la fausseté de cette opinion et en même temps pour étudier les propriétés remarquables des vapeurs, le moyen le plus simple consiste à leur offrir un espace vide d'air et de gaz, dans lequel elles puissent se développer librement par elles-mêmes. Le vide barométrique est éminemment propre à ce genre d'expériences; non-seulement parce qu'il est aussi parfait qu'il soit possible, mais aussi parce que, la colonne de mercure étant mobile, elle peut indiquer, par sa dépression, l'énergie de la force expansive qui s'exerce sur son sommet.

Supposons donc que, dans une large cuvette cc′ (*Fig.* 197), on dispose deux baromètres B et B′, qui donnent très-exactement la pression de l'atmosphère, et qu'ensuite, au moyen d'une pipette recourbée, on fasse passer une petite quantité d'eau dans le tube du baromètre B′. L'eau s'élève, en vertu de sa légèreté spécifique, elle arrive bientôt dans le vide de Toricelli, et, à l'instant, on voit le sommet de la colonne qui descend de plusieurs millimètres. Ce n'est pas le poids de la petite colonne d'eau supérieure qui a pu déprimer le mercure, ce n'est pas non plus l'air qu'elle aurait pu contenir et qui se serait dégagé; car nous la supposons parfaitement purgée d'air. Il faut donc que la substance propre de l'eau se soit vaporisée dans le vide, et que sa vapeur ait une propriété pareille à celle que nous avons appelée la *force expansive*, la

*force élastique* ou la *tension des gaz*; car elle agit comme ferait une petite quantité d'air que l'on aurait fait passer au dessus du mercure.

*La mesure de cette force élastique* est donnée par la *dépression*, c'est-à-dire par l'abaissement du sommet *t* au dessous du sommet *c*, ou en général par la différence de hauteur entre le vrai baromètre B et le baromètre à vapeur B′; en effet, si le sommet *t* est déprimé, par exemple, de quinze millimètres au dessous du sommet *c*, c'est qu'il s'est développé dans le vide au dessus de *t* une force élastique qui fait équilibre à cette colonne de mercure de quinze millimètres.

Un troisième baromètre B″, que l'on mettrait à côté des deux premiers et dans lequel on ferait passer un autre liquide, de l'éther sulfurique par exemple, éprouverait aussi une dépression instantanée, et une dépression beaucoup plus grande que celle du baromètre B′; car, en faisant l'expérience à la température ordinaire, le sommet tomberait à peu près à la moitié de la hauteur du baromètre B. D'où il résulte que, dans ces circonstances, la force élastique de la vapeur d'éther sulfurique est à peu près une demi-pression atmosphérique.

M. Gay-Lussac a fait construire un appareil qui est très-commode pour montrer au même instant les différentes forces élastiques des différentes substances et pour en donner la mesure. La *figure* 200 en représente une coupe verticale. *aa′* est un axe en bois ou en fer, qui peut tourner sur lui-même en s'appuyant en *a*, au fond d'une large cuvette *cc′*, et en *a′*, à l'extrémité du support PP; *d* et *d′* sont deux disques solides, fixés perpendiculairement à l'axe et portant de petites ouvertures correspondantes, dans lesquelles on fait tenir des tubes barométriques; *rr′* est une règle divisée qui peut monter ou descendre, et dont l'extrémité inférieure est terminée en pointe, afin qu'au moment de l'expérience on puisse l'amener plus sûrement

à affleurer le niveau du mercure ; *v* est un vernier qui parcourt toute la longueur de la règle et au moyen duquel on estime les vingtièmes de millimètre. Dans l'un des baromètres, le vide est au dessus de la colonne, dans les autres on fait passer des corps différens, de l'eau, de l'alcool, des éthers, du camphre, du musc, etc.; et l'on reconnaît ainsi que les vapeurs de tous ces corps se forment instantanément dans le vide, et qu'elles y prennent des forces élastiques différentes. Pour en avoir la mesure exacte, il suffit de faire tourner l'appareil et d'amener vis-à-vis la règle divisée le tube dont on veut connaître la dépression.

227. *Du maximum de tension des vapeurs.* — Il est évident que la force expansive des vapeurs s'exerce, dans tous les sens, comme la force expansive des gaz ; il est évident aussi qu'elle s'exerce indéfiniment, c'est-à-dire qu'une quantité de vapeur, quelque petite qu'elle soit, se répand de toutes parts dans un espace vide, quelque grand qu'il puisse être, et qu'elle va s'arrêter aux parois qui limitent cet espace en y exerçant une pression plus ou moins forte. Ainsi la moindre parcelle d'eau devient capable, en se vaporisant, de prendre un volume de plusieurs milliers de mètres cubes, comme ferait la moindre parcelle d'air en se répandant dans cet espace. Mais si les vapeurs ont une force expansive indéfinie, par laquelle elles peuvent prendre des volumes indéfiniment grands, elles n'ont pas une force élastique indéfiniment croissante, par laquelle elles puissent résister aux pressions qu'on exerce sur elles, et se réduire à prendre des volumes de plus en plus petits : nous allons voir en effet que, de la vapeur étant donnée, si on essaie de la comprimer, pour augmenter sa force élastique, on arrive à un point où cette vapeur se *condense* et repasse à l'état liquide plutôt que de prendre une force élastique plus grande; c'est *cette limite de résistance à être liquéfiée* que l'on appelle *la tension*

*maximum de la vapeur*. Cette vérité fondamentale peut être démontrée facilement, au moyen du baromètre à cuvette profonde, et qui est représenté *figure* 196; son tube T est très long et sa cuvette *cc'* a plusieurs pieds de profondeur. Après avoir fait bouillir, dans toute sa longueur, le tube plein de mercure, on achève de le remplir avec une colonne d'éther de deux ou trois centimètres d'épaisseur, et ensuite on le retourne verticalement pour le plonger dans la cuvette. L'éther gagne la partie supérieure du tube, une partie reste à l'état liquide et l'autre se vaporise dans le vide, de manière à produire une dépression considérable. La colonne *ns* aura, par exemple, 400 millimètres de hauteur, au lieu de 760 qu'elle prendrait, s'il n'y avait pas de vapeur. Cela fait, on enfonce le tube dans la cuvette, pour essayer de réduire à un moindre volume la vapeur qui s'est formée, et on observe alors deux phénomènes remarquables : premièrement, la colonne de mercure *sn* conserve exactement la même hauteur, ce qui prouve que la force élastique de la vapeur reste la même; secondement, la couche d'éther liquide augmente sensiblement d'épaisseur, à mesure que l'on enfonce, ce qui prouve que la vapeur se condense plutôt que de se laisser comprimer dans un moindre espace. Enfin, si l'on enfonce le tube au point de réduire de plus en plus la chambre barométrique, toute la vapeur disparaît et repasse à l'état liquide, sans que le sommet *s* ait éprouvé le moindre abaissement. Donc la vapeur d'éther a un maximum de force élastique. On peut même remarquer que c'est d'elle même qu'elle prend ce maximum, sans qu'il soit besoin de la comprimer pour la forcer à l'atteindre; et il en est toujours ainsi tant qu'elle est en contact avec le liquide qui lui donne naissance; car, en soulevant le tube pour agrandir la chambre barométrique, on observe encore que la colonne de mercure conserve la même hauteur *sn*, tandis que la couche liquide diminue de plus en plus. Ce qui est

une preuve visible que la vapeur se forme pour remplir le nouvel espace qui lui est offert et pour arriver toujours au maximum de tension. Mais si le tube peut être assez soulevé pour que le liquide disparaisse complètement, alors le sommet *s* de la colonne de mercure commence à s'élever, la dépression devient moindre, et, par conséquent, la force élastique de la vapeur cesse d'être à son maximum.

On peut même démontrer qu'à partir de cet instant les tensions sont en raison inverse des volumes, et qu'insi les vapeurs se compriment comme les gaz, en suivant la loi de Mariotte, aussi long-temps du moins qu'elles ne sont pas pressées au point de se condenser. Les autres liquides, soumis aux mêmes épreuves, se comportent comme l'éther; seulement leurs tensions maximum sont très-différentes.

228. *Equilibre de tension dans un espace inégalement chaud.* — Il est facile de reconnaître que la température a une grande influence sur la tension maximum des vapeurs; car en faisant les expériences précédentes à différens degrés de chaleur, la colonne barométrique éprouve des dépressions très-inégales. Par exemple, avec l'éther sulfurique, la dépression est à peu près de 180 millimètres à 0 de température, tandis qu'elle est de 630 à la température de 30°. Les phénomènes qui se produisent sous nos yeux nous fournissent d'ailleurs des preuves nombreuses de cette vérité : la vapeur d'eau n'a qu'une faible tension lorsqu'elle se forme à la surface des lacs ou à la surface de la mer; elle a une tension plus forte lorsqu'elle se forme par ébullition, puisqu'elle supporte alors la pression de l'atmosphère; enfin, à de hautes températures, cette tension devient si puissante qu'elle peut non-seulement lancer des projectiles du plus gros calibre, mais encore lancer au loin des machines entières et des masses énormes du poids de plusieurs quintaux; les explosions des machines à vapeur en offrent de trop nombreux et de trop terribles exemples. D'après cela, on peut se demander

quelle serait la tension maximum de la vapeur, dans un espace de forme quelconque, dont les diverses parties seraient à des températures différentes. En supposant que cet espace n'ait pas une grande hauteur verticale et que la vapeur soit, comme il arrive toujours, d'une faible densité, il faut, par les conditions d'équilibre des fluides élastiques (72), que la tension soit la même dans tous les points où il y a de la vapeur; et, comme dans les points les plus froids la tension maximum ne peut jamais être aussi grande que dans les points les plus chauds, il faut bien que, dans ces derniers, la tension cesse d'être au maximum et qu'elle diminue jusqu'à devenir égale à la tension maximum des points les plus froids. Ainsi, dans un espace inégalement chaud, quand l'équilibre est établi, la tension de la vapeur est la même dans tous les points, et partout elle est égale à la tension maximum des parties de cet espace qui sont à la température la plus basse. Ce principe est important pour toutes les recherches qui vont suivre et où nous essaierons de trouver les relations qui existent entre la force élastique des vapeurs et leur température.

229. *Mesure de la force élastique de la vapeur d'eau.* — On mesure la tension de la vapeur d'eau, entre 0 et 100°, au dessous de 0, et au dessus de 100° jusqu'aux plus hautes températures. Chacune de ces déterminations exige un appareil différent.

*Entre* 0 *et* 100°. — L'appareil se compose de deux tubes barométriques placés très-près l'un de l'autre et plongeant dans la même cuvette. Le premier de ces tubes est un baromètre parfait; le deuxième est un baromètre à vapeur, c'est-à-dire un baromètre au dessus duquel on a fait passer une petite colonne d'eau qui s'est en partie vaporisée dans le vide. Ces deux tubes sont enveloppés d'un *manchon* de verre, ou plutôt d'un autre tube qui plonge aussi dans la cuvette, et qui a 3 ou 4 pouces de largeur, et plus de

5o pouces de hauteur. On met de l'eau dans le manchon jusqu'à ce qu'elle dépasse les sommets des deux tubes barométriques, et ensuite on la refroidit et on la réchauffe graduellement, pour qu'elle parcoure tous les degrés depuis o jusqu'à 100°. Des thermomètres, placés à diverses hauteurs, indiquent à chaque instant sa température, et il est évident que cette température est aussi celle du baromètre parfait, celle du baromètre à vapeur, et celle de la vapeur elle-même, qui se forme à son sommet. Pour avoir la force élastique de cette vapeur correspondante à chaque degré, il suffit d'observer la dépression du baromètre à vapeur, par rapport au baromètre parfait, et l'on y parvient aisément au moyen d'une règle verticale qui est au dehors du manchon et sur laquelle se meuvent deux lunettes horizontales, dont l'une se dirige au sommet du baromètre parfait, et l'autre au sommet du baromètre à vapeur. L'intervalle des deux lunettes est la mesure de la dépression; il suffit seulement d'y faire une correction de température pour la ramener à o, car la colonne de mercure qui exprime la tension des vapeurs doit toujours être réduite à o, comme celle qui exprime la hauteur du baromètre. Tel est le procédé très-simple qui fut imaginé par Dalton de Manchester, en 1805, pour étudier les vapeurs, et qui lui servit à établir enfin la vraie théorie de leur formation et de leur élasticité.

*Au dessous de* o. — La glace elle-même se vaporise comme l'eau; plusieurs observations semblaient indiquer ce résultat, mais c'est à M. Gay-Lussac que nous devons un appareil propre à le constater d'une manière directe, et, de plus, à donner la mesure exacte de la tension des vapeurs qui se forment sur la glace à toutes les températures plus basses que o. Cet appareil est représenté *figure* 199; il se compose de deux baromètres plongeant dans la même cuvette, et d'un support au dessus duquel est un matras tubulé *m*, rempli d'un mélange frigorifique, et d'un ther-

momètre $t$, qui en donne la température; l'un des baromètres contient une petite colonne d'eau, et sa partie vide se recourbe pour pénétrer dans le mélange du matras et en prendre la température. Ainsi, la chambre barométrique se compose d'une partie froide, dont la température est connue et d'une autre partie qui est à la température ambiante; donc, d'après le principe précédent (228), la tension maximum de la vapeur est celle qui convient à la température du mélange refrigérant. On voit même, par cette expérience, comment s'établit l'équilibre de tension; car on voit la petite colonne d'eau qui repose au sommet du mercure, diminuer de plus en plus et disparaître complètement; elle disparaît parce que la vapeur qu'elle donne ayant, au moment de sa formation, une force expansive plus grande que la vapeur qui est refroidie à l'extrémité du tube, elle n'a rien qui l'arrête, et elle va se condenser et se congeler à son tour dans l'espace froid. Quelquefois même la rapidité de l'évaporation est si grande que la petite colonne d'eau se trouve congelée sur le mercure, et ne disparaît alors qu'après un temps très-long. Auprès des baromètres on voit une règle verticale sur laquelle se meut une lunette horizontale, avec laquelle on observe la dépression.

*Au dessus de* 100°. — Pour montrer qu'au dessus de 100° la tension de la vapeur d'eau est plus grande qu'une pression atmosphérique, on peut employer un simple tube recourbé (*Fig.* 198), dont la courte branche est fermée en $s$; on le remplit de mercure jusqu'à la demi-hauteur de la branche ouverte, et on fait passer en $s$ une petite colonne d'eau; ensuite on plonge l'appareil dans un bain d'huile dont la température est plus haute que 100°; bientôt la vapeur se forme, et sa force élastique est égale à une pression atmosphérique, plus la différence qui existe entre deux niveaux du mercure dans la branche ouverte et la branche fermée. Mais pour mesurer exactement les tensions qui s'élèvent à plusieurs atmosphères et les températures correspondantes,

on rencontre de très-grandes difficultés. La science ne possédait sur ce point que des données vagues et incertaines, lorsque MM. Arago et Dulong furent chargés par l'Académie des Sciences de déterminer les forces élastiques de la vapeur d'eau jusqu'aux plus hautes pressions dont on fasse usage dans les applications industrielles. Ce grand travail a été terminé en 1830; avant d'en rapporter les résultats, nous allons donner une idée des appareils qui ont servi à ces importantes déterminations.

*Production de la vapeur.* — La vapeur est produite dans une forte chaudière en tôle CC′, (*Fig.* 223, planche 10), contenant environ 80 litres. Dans sa portion cylindrique qui est la plus faible, elle a 13 millimètres d'épaisseur. La même figure représente le fourneau FF′, la grille G, et le tuyau T par lequel s'échappe la fumée.

*Mesure des températures.* Deux canons de fusil E et R, scellés au couvercle, ouverts en haut, fermés en bas et plein de mercure, servent à indiquer les températures de l'eau et de la vapeur. Dans le mercure qu'ils contiennent sont établis en permanence des thermomètres dont les tiges, recourbées horizontalement au sortir des canons, sont maintenues à une température constante au moyen d'un courant d'eau. Cette disposition se voit plus en grand dans la *figure* 224.

*Mesure des tensions.* — La vapeur formée au dessus de l'eau, à une température connue, s'élève par le petit tube vertical BB′ pour venir exercer sa pression en U, au sommet de la colonne d'eau qui remplit le tube incliné UDH, et toute la partie supérieure du vase manométrique VV′. Cette pression se transmet sur la surface SS′ du mercure, et enfin à l'air du manomètre MM′ qui est le même que nous avons décrit précédemment (*page* 170). Comme on connaît la pression correspondante à une position donnée du sommet de la colonne du mercure dans le manomètre, on en déduit la force élastique de la vapeur. Il y a seulement

deux corrections à faire, l'une relative à sa hauteur verticale de la colonne d'eau, depuis son sommet U jusqu'à sa base SS', et l'autre relative à la hauteur variable du mercure dans le vase VV'. C'est pour faire ces corrections avec exactitude que l'on voit sur la seconde platine du vase VV' un petit tube en verre NN' communiquant en outre au tube UDH, et dans lequel on peut observer le niveau du mercure au moyen du curseur qui parcourt la règle verticale ZZ'.

A mesure que la vapeur arrive en U, elle se condense et retombe dans la chaudière; mais il n'en peut résulter aucune erreur, car on a soin de maintenir le tube UDH à une température constante dans sa longueur UD par un courant d'eau.

MM. Arago et Dulong ont ainsi déterminé les tensions de la vapeur d'eau jusqu'à *vingt-quatre* atmosphères. Ils ont reconnu ensuite que les relations qui existent entre les tensions et les températures peuvent être représentées avec une grande approximation par la formule

$$F = (1 + 0,7153 . T)^5$$

F représente la tension exprimée en atmosphères.

T représente les températures supérieures à 100°, exprimées en prenant pour unité l'intervalle de 100°. Ainsi, pour connaître la force élastique correspondante à 136°, par exemple, il faudrait faire T = 0,36.

Il paraît bien probable que cette formule représente d'une manière assez approchée les tensions et les températures correspondantes jusqu'à 50 atmosphères.

On ne pourrait pas sans doute se fier à ces indications pour des tensions plus fortes; cependant le dernier des tableaux suivans a été calculé jusqu'à *mille atmosphères*; s'il ne représente pas la marche des phénomènes, il représente au moins la marche de la formule.

PREMIER TABLEAU.

*Forces élastiques de la Vapeur d'eau depuis — 20° jusqu'à 100° centigrades.*

| DEGRÉS du thermom. centigrade. | TENSION de la vapeur en millimètr. | PRESSION sur un cent. carré en kilog. | DEGRÉS du thermom. centigrade. | TENSION de la vapeur en millimètr. | PRESSION sur un cent. carré en kilog. |
|---|---|---|---|---|---|
| deg. | mm. | kil. | deg. | mm. | kil. |
| — 20 | 1,333 | 0,0018 | 39 | 50,147 | 0,0681 |
| — 15 | 1,879 | 0,0026 | 40 | 52,998 | 0,0720 |
| — 10 | 2,631 | 0,0036 | 41 | 55,772 | 0,0758 |
| — 5 | 3,660 | 0,0050 | 42 | 58,792 | 0,0799 |
| 0 | 5,059 | 0,0069 | 43 | 61,958 | 0,08418 |
| 1 | 5,393 | 0,0074 | 44 | 65,627 | 0,08916 |
| 2 | 5,748 | 0,0078 | 45 | 68,751 | 0,09340 |
| 3 | 6,123 | 0,0084 | 46 | 72,393 | 0,09835 |
| 4 | 6,523 | 0,0089 | 47 | 76,205 | 0,10353 |
| 5 | 6,947 | 0,0094 | 48 | 80,195 | 6,10900 |
| 6 | 7,396 | 0,0101 | 49 | 84,370 | 0,11662 |
| 7 | 7,871 | 0,0107 | 50 | 88,743 | 0,12056 |
| 8 | 8,375 | 0,0114 | 51 | 93,301 | 0,12676 |
| 9 | 8,909 | 0,0122 | 52 | 98,075 | 0,13325 |
| 10 | 9,475 | 0,0129 | 53 | 103,060 | 0,13999 |
| 11 | 10,074 | 0,0137 | 54 | 108,070 | 0,14710 |
| 12 | 10,707 | 0,0146 | 55 | 113,710 | 0,15449 |
| 13 | 11,378 | 0,0155 | 56 | 119,390 | 0,16220 |
| 14 | 12,087 | 0,0165 | 57 | 125,310 | 0,17035 |
| 15 | 12,837 | 0,0170 | 58 | 131,500 | 0,17866 |
| 16 | 13,630 | 0,0186 | 59 | 137,940 | 0,18736 |
| 17 | 14,468 | 0,0197 | 60 | 144,660 | 0,19653 |
| 18 | 15,353 | 0,0209 | 61 | 151,700 | 0,20610 |
| 19 | 16,288 | 0,0222 | 62 | 158,960 | 0,21586 |
| 20 | 17,314 | 0,0235 | 63 | 165,560 | 0,22639 |
| 21 | 18,317 | 0,0250 | 64 | 174,470 | 0,23758 |
| 22 | 19,447 | 0,0265 | 65 | 182,710 | 0,24823 |
| 23 | 20,577 | 0,0281 | 66 | 191,270 | 0,25986 |
| 24 | 21,805 | 0,0297 | 67 | 200,180 | 0,27196 |
| 25 | 23,090 | 0,0314 | 68 | 209,440 | 0,28454 |
| 26 | 24,452 | 0,0334 | 69 | 219,060 | 0,29761 |
| 27 | 25,881 | 0,0353 | 70 | 229,070 | 0,31121 |
| 28 | 27,390 | 0,0374 | 71 | 239,450 | 0,32532 |
| 29 | 29,045 | 0,0396 | 72 | 250,230 | 0,33996 |
| 30 | 30,643 | 0,0418 | 73 | 261,430 | 0,35518 |
| 31 | 32,410 | 0,0440 | 74 | 273,030 | 0,37094 |
| 32 | 34,261 | 0,0465 | 75 | 285,070 | 0,39632 |
| 33 | 36,188 | 0,0492 | 76 | 297,570 | 0,40428 |
| 34 | 38,254 | 0,0520 | 77 | 310,490 | 0,42184 |
| 35 | 40,404 | 0,0549 | 78 | 323,890 | 0,44004 |
| 36 | 42,743 | 0,0581 | 79 | 337,760 | 0,45888 |
| 37 | 45,038 | 0,0612 | 80 | 352,080 | 0,47834 |
| 38 | 47,579 | 0,0646 | 81 | 367,000 | 0,49860 |

| DEGRÉS du thermom. centigrade. | TENSION de la vapeur en millimètr. | PRESSION sur un cent. carré en kilogr. | DEGRÉS du thermom. centigrade. | TENSION de la vapeur en millimètr. | PRESSION sur un cent. carré. en kilog. |
|---|---|---|---|---|---|
| deg. | mm. | kil. | deg. | mm. | kil. |
| 82 | 382,380 | 0,51950 | 92 | 566,95 | 0,77026 |
| 83 | 398,280 | 0,54110 | 93 | 588,74 | 0,79986 |
| 84 | 414,730 | 0,56345 | 94 | 611,18 | 0,83035 |
| 85 | 431,710 | 0,58652 | 95 | 634,27 | 0,86172 |
| 86 | 449,260 | 0,61036 | 96 | 658,05 | 0,89402 |
| 87 | 467,380 | 0,63498 | 97 | 682,59 | 0,92736 |
| 88 | 486,090 | 0,66040 | 98 | 707,63 | 0,96138 |
| 89 | 505,380 | 0,68661 | 99 | 733,46 | 0,99448 |
| 90 | 525,28 | 0,71364 | 100 | 760,00 | 1,03253 |
| 91 | 547,80 | 0,74152 | | | |

DEUXIÈME TABLEAU.

*Forces élastiques de la vapeur d'eau, et températures correspondantes*

De 1 à 24 atmosphères d'après l'observation,
Et de 24 à 50 pour le calcul.

| FORCES élastiques exprimées en atmosphèr. de 76 centimètres de mercure. | TEMPÉRATURES correspondantes données par le thermomètre centigrade à mercure. | PRESSION sur un centimètre carré en kilogrammes. | FORCES élastiques exprimées en atmosphèr. de 76 centimètres de mercure. | TEMPÉRATURES correspondantes données par le thermomètre centigrade à mercure. | PRESSION sur un centimètre carré en kilogrammes. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 100 | 1,033 | 13 | 193,7 | 13,429 |
| 1 1/2 | 112,2 | 1,549 | 14 | 197,19 | 14,462 |
| 2 | 121,4 | 2,066 | 15 | 200,48 | 15,495 |
| 2 1/2 | 128,8 | 2,582 | 16 | 203,60 | 16,528 |
| 3 | 135,1 | 3,099 | 17 | 206,57 | 17,561 |
| 3 1/2 | 140,6 | 3,615 | 18 | 209,4 | 18,594 |
| 4 | 145,4 | 4,132 | 19 | 212,1 | 19,627 |
| 4 1/2 | 149,06 | 4,648 | 20 | 214,7 | 20,660 |
| 5 | 153,08 | 5,165 | 21 | 217,2 | 21,693 |
| 5 1/2 | 156,8 | 5,681 | 22 | 219,6 | 22,726 |
| 6 | 160,2 | 6,198 | 23 | 221,9 | 23,759 |
| 6 1/2 | 163,48 | 6,714 | 24 | 224,2 | 24,792 |
| 7 | 166,5 | 7,231 | 25 | 226,3 | 25,825 |
| 7 1/2 | 169,37 | 7,747 | 30 | 236,2 | 30,990 |
| 8 | 172,1 | 8,264 | 35 | 244,85 | 36,155 |
| 9 | 177,1 | 9,297 | 40 | 252,55 | 41,320 |
| 10 | 181,6 | 10,33 | 45 | 259,52 | 46,485 |
| 11 | 186,03 | 11,363 | 50 | 265,89 | 51,650 |
| 12 | 190,0 | 12,396 | | | |

TROISIÈME TABLEAU.

*Forces élastiques de la vapeur d'eau et températures correspondantes de* cent *à* mille *atmosphères, d'après la formule empirique.*

| FORCES élastiques exprimées en atmosphères. | TEMPÉRATURES correspondantes | PRESSION sur 1 centimètre carré en kilogrammes. | FORCES élastiques exprimées en atmosphères. | TEMPÉRATURES correspondantes. | PRESSION sur 1 centimètre carré en kilogrammes. |
|---|---|---|---|---|---|
| 100 | 311,36 | 103,3 | 600 | 462,71 | 619,8 |
| 200 | 363,58 | 206,60 | 700 | 478,45 | 723,1 |
| 300 | 397,65 | 309,90 | 800 | 492,47 | 826,4 |
| 400 | 423,57 | 413,20 | 900 | 505,16 | 929,7 |
| 500 | 444,70 | 516,50 | 1000 | 516,76 | 1033,0 |

230. *Tension des vapeurs des divers liquides.* — On voit dans le tableau précédent qu'au point d'ébullition la vapeur d'eau a une tension qui fait équilibre à une pression atmosphérique : cette propriété est tout-à-fait générale ; la tension de la vapeur qui se forme par ébullition est toujours égale à la pression qui s'exerce sur la snrface du liquide ; car si elle était moindre, la vapeur ne pourrait ni se former, ni subsister en bulle au milieu de la masse liquide, et si elle était plus forte, elle se serait formée plus tôt, rien n'empêchant qu'elle se forme dès l'instant qu'elle peut vaincre la pression. A l'ébullition les vapeurs de tous les liquides ayant des tensions égales, M. Dalton avait pensé qu'en s'écartant d'un même nombre de degrés au dessus et au dessous de ce point, les tensions ne cesseraient pas d'être encore égales entre elles. Ainsi, d'après cette *loi de Dalton*, et avec la table des tensions de la vapeur d'eau, il suffirait d'avoir le point d'ébullition d'un liquide ou la tension de sa vapeur à une température quelconque pour déterminer sa tension à toutes les températures possibles. Par exemple, l'alcool

ayant son point d'ébullition à 78°, la tension de sa vapeur à 113°, c'est-à-dire à 35° au dessus de son point d'ébullition, serait la même que la tension de la vapeur d'eau à 135°, et par conséquent de 2280$^{mm}$ ou 3 atmosphères; et à 0, c'est-à-dire à 78° au dessous de son point d'ébullition, sa tension serait la même que celle de la vapeur d'eau à 100—78 ou à 22°, et par conséquent de 19$^{mm}$, 447. Pareillement l'éther sulfurique ayant à 20° une force élastique de 431$^{mm}$,710, et l'eau ayant la même tension à 85°, il en résulterait qu'à 30° l'éther sulfurique aurait la même tension que la vapeur d'eau à 95° et à 35° la même tension que la vapeur d'eau à 100°, etc. Mais il résulte des observations de plusieurs physiciens que cette loi n'est pas absolument rigoureuse; à de grandes distances des points d'ébullition elle commence à s'écarter sensiblement de la vérité, et s'il est toujours commode de s'en servir lorsqu'on ne veut que des approximations, il serait nécessaire de l'abandonner lorsqu'on voudrait de l'exactitude. Il est donc à souhaiter que, du moins pour les liquides les plus communs, les physiciens dressent des tables de tension pareilles à la table des tensions de la vapeur d'eau.

231. *Densité de la vapeur d'eau.* — Entre tous les moyens qui ont été employés pour obtenir la densité de la vapeur d'eau, celui de M. Gay-Lussac paraît le plus simple et le plus rigoureux; il consiste à chercher directement le poids, le volume, la température et la tension d'une quantité de vapeur donnée. Pour cela on se sert de l'appareil qui est représenté dans la *figure* 201. C'est un fourneau F sur lequel repose une chaudière C en fonte dont le bord B a été travaillé de manière à former un plan qu'on ajuste avec un niveau dans la direction horizontale; G est une cloche graduée, de trois ou quatre décimètres de longueur, plongeant dans le bain de mercure de la chaudière; MM est un manchon de verre dans lequel on verse un liquide qui enveloppe la cloche dans toute sa longueur, depuis le

niveau extérieur du mercure, et qui la recouvre à son sommet; *rr* est une règle divisée qui se met verticalement au moyen de la traverse *tt*, dont la face plane se pose exactement sur le bord horizontal de la chaudière. La cloche est pleine de mercure bouilli, et en outre on y fait passer une petite ampoule de verre A, scellée par les deux bouts, et presque entièrement remplie d'eau. On met des charbons sous la chaudière; le mercure, l'ampoule et l'eau du manchon s'échauffent graduellement, et divers thermomètres donnent à chaque instant leur température commune. A un certain instant l'ampoule crève par l'effort de la dilatation de l'eau qu'elle contient, la vapeur se forme au dessus de la cloche, le mercure est déprimé, et on pousse la température jusqu'à ce que l'eau soit complètement vaporisée, c'est une condition nécessaire. Alors on maintient les choses dans cet état pour accomplir toutes les observations.

1°. L'eau étant toute vaporisée, on connaît le poids de la vapeur, car on a eu soin de peser l'ampoule vide et de la peser ensuite après l'avoir remplie; la différence des deux pesées est le poids de l'eau, et par conséquent celui de la vapeur.

2°. On observe le nombre des divisions de la cloche qu'occupe la vapeur; chacune de ces divisions ayant une capacité connue à la température *o*, on trouvera facilement, par le moyen de la dilatation du verre, sa capacité pour la température où l'on opère, et de la sorte on aura le volume réel de la vapeur.

3°. Les thermomètres indiquent la température du liquide du manchon et celle de l'eau vaporisée dans la cloche.

4°. Enfin, on observe la tension de la vapeur au moyen de la règle *rr*. D'abord on la fait monter ou descendre, de manière que sa pointe inférieure vienne affleurer la surface du mercure de la chaudière, et ensuite on fait marcher le

*voyant v* jusqu'à ce que le rayon visuel rase le sommet de la colonne du mercure de la cloche. La longueur qui se trouve entre la pointe et le *voyant* est la hauteur de la colonne soulevée, on la réduit à *o*, on la retranche de la hauteur actuelle du baromètre, pareillement réduite à *o*, et la différence est la dépression de la colonne barométrique ou la force élastique de la vapeur. Si cette force approchait trop de la tension maximum pour la température à laquelle on opère, il faudrait craindre que toute l'eau ne fût pas vaporisée, et chauffer davantage pour se mettre à l'abri de cette chance d'erreur.

Ayant ainsi le poids d'un volume donné de vapeur à une température et sous une prossion connue, on en déduit aisément le poids d'un centimètre cube. Or, le poids d'un centimètre cube d'air, soumis aux mêmes circonstances de température et de pression, est facile à trouver par la formule que nous avons donnée (192) ; lorsqu'on sait qu'à 0°, et sous la pression de $760^{mm}$, un centimètre cube d'air sec pèse $0^{g},0012990505$, ou ce qui revient au même que sa densité est D = 0,0012990505. On pourra donc avoir le rapport du poids de la vapeur au poids de l'air, pris sous le même volume à la même température et à la même pression, c'est-à-dire la densité de la vapeur par rapport à celle de l'air, et M. Gay-Lussac a trouvé qu'elle en est les $\frac{5}{8}$.

Il est facile ainsi de trouver le volume que doit occuper $1^{gr.}$ de vapeur à la température de 100°, et sous la pression maximum de $760^{mm}$.

Car un centimètre cube d'air à 0 pesant $0^{g},0012990505$ sous la pression de $760^{mm}$, et ce centimètre cube devenant 1,375 lorsqu'il passe à 100° sous la même pression, l'on voit qu'alors

$$1^{cc},375 \text{ pèse } 0^{g}.0012990505;$$

Et par conséquent que,

$$1^{gr.} \text{ occupe un volume } \frac{1,375}{0,0012990505} = 1058^{cc},47.$$

Ainsi, 1gr. de vapeur à 100° sous 760mm, doit occuper les $\frac{8}{5}$ de 1058cc,47 ou 1693cc,55; donc un centimètre cube d'eau, qui pèse 1gr., prend en se vaporisant à 100° un volume de 1693,cc55, c'est-à-dire un volume qui est environ 1700 fois plus grand; pourvu toutefois que sa force élastique soit maximum.

Enfin, avec ces données on peut trouver la densité D′ de la vapeur d'eau à une température quelconque $t$, et sous une pression quelconque P; car, en représentant par D sa densité à 100° sous la pression de 760mm, on verra, par un raisonnement analogue à celui que nous avons déjà fait (193), que

$$D' = D \frac{P}{760} \cdot \frac{(1 + 100a)}{(1 + at)}$$

$a$ étant le coefficient de la dilatation, qui est commun aux gaz et aux vapeurs, et qui est 0,00375. Par cette formule on aura la densité au maximum de tension, lorsqu'après avoir donné à $t$ une valeur, on donnera à P la valeur en millimètres de la tension maximum correspondante.

On peut s'étonner que beaucoup d'auteurs prennent la peine de discuter longuement la question de savoir si les densités de la vapeur sont ou ne sont pas proportionnelles aux tensions. On voit par la formule précédente qu'il faut bien que les densités soient proportionnelles aux tensions, lorsque les vapeurs sont réduites à une même température, et qu'il est impossible que cela soit lorsque l'on considère les vapeurs à des températures différentes; et cette formule repose sur deux vérités que personne ne conteste; savoir, premièrement, qu'au dessous du maximum de tension, les vapeurs se dilatent comme les gaz; et secondement, qu'elles se compriment suivant la loi de Mariotte.

En calculant les densités de la vapeur d'eau pour diverses températures, on voit qu'elles vont croissant d'une manière très-rapide; d'où il résulte qu'à un certain degré de chaleur la vapeur doit avoir une densité qui ne surpasse que

de très-peu la densité du liquide lui-même. Cette conséquence a été vérifiée et rendue frappante par une expérience curieuse de M. Cagniard de la Tour. Un tube de verre très-fort, étant rempli d'eau à peu près au quart de sa capacité, puis purgé d'air, et ensuite scellé, on l'expose à une température graduellement croissante; alors à un certain degré de chaleur l'eau semble disparaître, le tube est comme vide; mais en refroidissant un peu, le liquide reparaît presque subitement. On pourrait se faire une sorte de jeu de ces alternatives d'apparition et de disparition, si l'on ne devait pas, en les répétant, craindre de dangereuses explosions.

C'est à une température voisine de celle de la fusion du zinc que l'eau se vaporise complètement dans un espace à peu près quadruple de son volume à l'état liquide; en même temps elle agit sur le verre, et lui ôte sa transparence en dissolvant sans doute quelques-uns de ses élémens. D'après cela on peut présumer qu'à la température rouge, la densité de la vapeur d'eau à son maximum de tension est peu différente de la densité de l'eau liquide, et qu'alors elle a une force expansive de plusieurs centaines, et peut-être de quelques milliers d'atmosphères.

En parcourant les tableaux suivans, on pourra prendre une idée de l'accroissement de la densité de la vapeur d'eau, à mesure que la température s'élève.

PREMIER TABLEAU.

*Densité et volume de la vapeur d'eau, au maximum de tension, en prenant pour unités la densité et le volume de l'eau liquide à 0.*

Depuis — 20° à 100°.

| Température. | Tension. | Densité. | Volume. | Température. | Tension. | Densité. | Volume. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| deg. | mm. | | | deg. | mm. | | |
| —20 | 1,333 | 0,00000154 | 650588 | 38 | 47,579 | 0,00004442 | 22513 |
| —15 | 1,879 | 212 | 470898 | 39 | 50,147 | 4666 | 21429 |
| —10 | 2,631 | 292 | 342984 | 40 | 52.998 | 4916 | 20343 |
| — 5 | 3,660 | 398 | 251358 | 41 | 55,772 | 5156 | 19396 |
| 0 | 5,059 | 540 | 182323 | 42 | 58.792 | 5418 | 18459 |
| 1 | 5,393 | 573 | 174495 | 43 | 61,958 | 5691 | 17572 |
| 2 | 5,748 | 609 | 164332 | 44 | 65,627 | 6023 | 16805 |
| 3 | 6,123 | 646 | 154842 | 45 | 68,751 | 6274 | 15938 |
| 4 | 6,523 | 686 | 145886 | 46 | 72,393 | 6585 | 15185 |
| 5 | 6,947 | 727 | 137488 | 47 | 76,205 | 6910 | 14472 |
| 6 | 7,396 | 772 | 129587 | 48 | 80,195 | 7242 | 13809 |
| 7 | 7,871 | 818 | 122241 | 49 | 84,370 | 7602 | 13154 |
| 8 | 8,375 | 867 | 115305 | 50 | 88,742 | 7970 | 12546 |
| 9 | 8,909 | 919 | 108790 | 51 | 93,301 | 8354 | 11971 |
| 10 | 9,475 | 974 | 102670 | 52 | 98,075 | 8753 | 11424 |
| 11 | 10,074 | 0,00001032 | 99202 | 53 | 103,060 | 9174 | 10901 |
| 12 | 10,707 | 1092 | 91564 | 54 | 108,270 | 9606 | 10410 |
| 13 | 11,378 | 1157 | 86426 | 55 | 113,710 | 0,00010054 | 9946 |
| 14 | 12,087 | 1224 | 81686 | 56 | 119,390 | 10525 | 9501 |
| 15 | 12,837 | 1299 | 77008 | 57 | 125,310 | 11011 | 9082 |
| 16 | 13,630 | 1372 | 72913 | 58 | 131,500 | 11523 | 8680 |
| 17 | 14,468 | 1451 | 68923 | 59 | 137,940 | 12044 | 8303 |
| 18 | 15,353 | 1534 | 65201 | 60 | 144,660 | 12599 | 7937 |
| 19 | 16,288 | 1622 | 61654 | 61 | 151,700 | 13179 | 7594 |
| 20 | 17,314 | 1718 | 58224 | 62 | 158,960 | 13760 | 7267 |
| 21 | 18,317 | 1811 | 55206 | 63 | 166,560 | 14374 | 6957 |
| 22 | 19,417 | 1914 | 52260 | 64 | 174,470 | 15010 | 6662 |
| 23 | 20,577 | 2021 | 49487 | 65 | 182,710 | 15668 | 6382 |
| 24 | 21,805 | 2133 | 46877 | 66 | 191,270 | 16356 | 6114 |
| 25 | 23,090 | 2252 | 44411 | 67 | 200,180 | 17060 | 5860 |
| 26 | 24,452 | 2376 | 42084 | 68 | 209,440 | 17797 | 5619 |
| 27 | 25,881 | 2507 | 39895 | 69 | 219,060 | 18566 | 5386 |
| 28 | 27,390 | 2643 | 37838 | 70 | 229,070 | 19355 | 5167 |
| 29 | 29,045 | 2794 | 35796 | 71 | 239,450 | 20174 | 4957 |
| 30 | 30,643 | 2938 | 34041 | 72 | 250,230 | 21013 | 4759 |
| 31 | 32,410 | 3097 | 32291 | 73 | 261,430 | 21889 | 4569 |
| 32 | 34,261 | 3263 | 30650 | 74 | 273,030 | 22794 | 4387 |
| 33 | 36,188 | 3435 | 29112 | 75 | 285,070 | 23789 | 4204 |
| 34 | 38,254 | 3619 | 27636 | 76 | 297,570 | 24702 | 4048 |
| 35 | 40,404 | 3809 | 26253 | 77 | 310,490 | 25699 | 3891 |
| 36 | 42,743 | 4017 | 24897 | 78 | 323.890 | 26739 | 3741 |
| 37 | 45,038 | 4219 | 23704 | 79 | 337,760 | 27789 | 3599 |

| Température. | Tension. | Densité. | Volume. | Température. | Tension. | Densité. | Volume. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| deg. | mm. | | | deg | mm. | | |
| 80 | 352,080 | 0,00028889 | 3462 | 91 | 545,800 | 0,00043405 | 2304 |
| 81 | 367,000 | 30025 | 3331 | 92 | 566,950 | 44956 | 2224 |
| 82 | 382,380 | 31195 | 3206 | 93 | 588,740 | 46556 | 2148 |
| 83 | 398,280 | 32399 | 3087 | 94 | 611,180 | 48201 | 2075 |
| 84 | 414,730 | 33637 | 2973 | 95 | 634,270 | 49886 | 2005 |
| 85 | 431,710 | 34916 | 2864 | 96 | 658,050 | 51613 | 1938 |
| 86 | 449,260 | 36237 | 2760 | 97 | 682,590 | 53388 | 1873 |
| 87 | 467,380 | 37590 | 2660 | 98 | 707,630 | 55191 | 1812 |
| 88 | 486,090 | 38984 | 2565 | 99 | 733,460 | 57055 | 1751 |
| 89 | 505,380 | 40417 | 2474 | 100 | 760,000 | 58955 | 1696 |
| 90 | 525,280 | 41891 | 2387 | | | | |

DEUXIÈME TABLEAU.

*Densité et volume de la valeur d'eau au maximum de tension, en prenant pour unités la densité et le volume de l'eau liquide à 0 :*

Depuis 1 à 24 atmosphères d'après l'observation,
Et depuis 24 à 50 d'après la formule empirique.

| Températures. | FORCES élastiques exprimées en atmosph. | DENSITÉ. | VOLUME. | Températures. | FORCES élastiques exprimées en atmosph. | DENSITÉ. | VOLUME. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 100 | 1 | 0,00058955 | 1696 | 193,7 | 13 | 0,0061074 | 163,74 |
| 112,2 | 1 1/2 | 0,0008563 | 1167,8 | 197,19 | 14 | 0,0065270 | 153,10 |
| 121,4 | 2 | 0,0011147 | 897,09 | 200,48 | 15 | 0,0069444 | 144,00 |
| 128,8 | 2 1/2 | 0,0013673 | 731,39 | 203,60 | 16 | 0,0073586 | 135,90 |
| 135,1 | 3 [illegible] | 0,0016150 | 619,19 | 206,57 | 17 | 0,0077692 | 128,71 |
| 140,6 | 3 1/2 | 0,0018589 | 537,96 | 209,4 | 18 | 0,0081778 | 122,28 |
| 145,4 | 4 | 0,0020997 | 476,26 | 212,1 | 19 | 0,0085831 | 116,51 |
| 149,06 | 4 1/2 | 0,0023410 | 427,18 | 214,7 | 20 | 0,0089863 | 111,28 |
| 153,08 | 5 | 0,0025763 | 388,16 | 217,2 | 21 | 0,0093868 | 106,53 |
| 156,8 | 5 1/2 | 0,0028091 | 355,99 | 219,6 | 22 | 0,0097853 | 102,195 |
| 160,2 | 6 | 0,0030402 | 328,93 | 221,9 | 23 | 0,010182 | 98,213 |
| 163,48 | 6 1/2 | 0,0032683 | 305,98 | 224,2 | 24 | 0,010575 | 94,562 |
| 166,5 | 7 | 0,0034911 | 286,12 | 226,3 | 25 | 0,010968 | 91,171 |
| 169,37 | 7 1/2 | 0,0037217 | 268,82 | 236,2 | 30 | 0 012903 | 77,50 |
| 172,1 | 8 | 0,0039434 | 253,59 | 244,85 | 35 | 0,014663 | 68,198 |
| 177,1 | 9 | 0,0043865 | 227,98 | 252,55 | 40 | 0,016644 | 60,08 |
| 181,6 | 10 | 0,0048226 | 207,36 | 259,52 | 45 | 0,018497 | 54,064 |
| 186,03 | 11 | 0,0052557 | 190,27 | 265,89 | 50 | 0,020306 | 49,315 |
| 190,0 | 12 | 0,0056834 | 175,96 | | | | |

TROISIÈME TABLEAU.

*Densité et volume de la vapeur d'eau au maximum de tension, en prenant pour unité le volume et la densité de l'eau à* 0.

Depuis *cent* à *mille* atmosphères d'après la formule empirique.

| Tempé-ratures. | FORCES élastiques expri-mées en atmosph. | DENSITÉ. | VOLUME | Tempé-ratures. | FORCES élastiques expri-mées en atmosph. | DENSITÉ. | VOLUME |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 311,36 | 100 | 0,037417 | 26,72 | 462,71 | 600 | 0,17791 | 5,621 |
| 363,58 | 200 | 0,068635 | 14,570 | 478,45 | 700 | 0,20318 | 4,921 |
| 397,65 | 300 | 0,097671 | 10,238 | 492,47 | 800 | 0,2279 | 4,387 |
| 423,57 | 400 | 0,12534 | 7,978 | 505,16 | 900 | 0,2522 | 3,965 |
| 444,70 | 500 | 0,15202 | 6,578 | 516,76 | 1000 | 0,276 | 3,622 |

*Densité des vapeurs de divers liquides.* (Voyez le tableau de densités, page 285.)

Les densités des vapeurs de tous les liquides ne peuvent pas être déterminées par le procédé qui nous a servi pour la vapeur d'eau; mais l'on doit à M. Dumas un autre procédé dont il s'est servi avec succès dans l'important travail qu'il a publié sur ce sujet (*Ann. de physique et de chimie*, t. 33, page 337). M. Dumas prend un ballon à col effilé; il y met une quantité suffisante du liquide qu'il veut soumettre à l'expérience, puis il chauffe ce ballon dans un bain d'eau, d'acide sulfurique ou d'alliage fusible. Quand le liquide commence à entrer en ébullition, l'on modère la température et l'on chauffe aussi également qu'il soit possible toute la surface du ballon et même son col effilé. L'ébullition terminée, on chauffe encore avec les mêmes précautions jusqu'à une température un peu plus élevée; alors on note cette température avec soin, on observe le baromètre, et d'un trait de chalumeau on scelle la pointe effilée du bal-

lon. Il reste ensuite à faire trois pesées, 1°. le ballon avec la vapeur qu'il contient; 2°. le ballon plein d'eau; 3°. le ballon plein d'air sec. De la seconde on déduit la capacité, de la troisième le poids du verre, et enfin de la première le poids de la vapeur. C'est par ce moyen que M. Dumas a obtenu les nombres contenus dans le tableau de la page 285.

Au maximum de tension les vapeurs de tous les liquides connus augmentent de densité à mesure que la température s'élève. D'où il suit, que tout le liquide peut, à une température plus ou moins haute, disparaître complètement dans un espace un peu plus grand que celui qu'il occupe. C'est aussi ce que M. Cagniard de La Tour a fait voir pour l'alcool, l'éther et le sulfure de carbone. Il a de plus observé la température à laquelle se produit le phénomène, et mesuré la tension qu'exerce alors la vapeur. Pour cela, il faisait ses expériences dans un tube recourbé, semblable à peu près à un baromètre à siphon. La courte branche avait 4 à 5 millimètres de diamètre; elle contenait le liquide; et la plus longue, 1 millimètre seulement; elle contenait de l'air. Mais le liquide et l'air étaient séparés par du mercure qu'on avait d'avance versé dans la courbure quand les deux branches étaient ouvertes; le mercure refoulé par la pression pouvait remplir toute la longueur du tube à air. Les deux branches étant scellées, la colonne d'air de plus en plus réduite faisait l'office de manomètre, pour marquer la tension de la vapeur; quant à sa température, elle était donnée par celle du bain d'huile fixe, dans lequel on plongeait l'extrémité inférieure de l'appareil et toute la longueur de la courte branche.

L'instant de la disparition et de la réduction complète en vapeur arrive dans les circonstances et aux conditions suivantes :

| | Température de disparition. | Volume de la vapeur par rapport au volume du liquide. | Tension de la vapeur en nombre d'atmosphères. |
|---|---|---|---|
| Alcool (à 36° Beaumé). | 259°. . . . . | 3. . . . . | 119atm. |
| Éther.. . . . . . . . . . | 200°. . . . . | 2. . . . . | 37 |
| Sulfure de carbone. . . | 275°. . . . . | 2. . . . . | 78 |

233. *Condensation des vapeurs, et liquéfaction des gaz.* — Les vapeurs se condensent par compression et par refroidissement. Lorsque la vapeur sature l'espace qu'elle occupe, il suffit d'exercer sur elle une pression un peu supérieure à sa tension maximum, ou d'abaisser un peu sa température, pour qu'à l'instant elle se liquéfie dans une certaine proportion. Mais quand elle ne sature plus l'espace, elle se laisse comprimer comme les gaz, et refroidir comme eux. Cette identité parfaite, entre les propriétés caractéristiques des gaz et celle des vapeurs, avait fait supposer depuis longtemps que les gaz appelés *permanens* pourraient bien n'être que des vapeurs plus ou moins éloignées de leur maximum de tension. Plusieurs expériences avaient été tentées dans cette vue, par divers moyens, mais toujours sans succès, soit à cause de la difficulté qu'on éprouve à produire de grandes pressions, soit à cause de la chaleur qui se dégage lorsqu'on les produit subitement. Enfin, par un procédé plus sûr et plus ingénieux, sir H. Davy et M. Faraday sont parvenus à liquéfier plusieurs des fluides élastiques que l'on appelait gaz permanens. Ce procédé consiste à enfermer, dans un tube de verre très-fort, un réactif et une substance solide qui dégage, par la réaction chimique, le gaz que l'on veut soumettre à l'épreuve. Ainsi, c'est le gaz qui se comprime lui-même à mesure qu'il se dégage en plus grande abondance, et de cette manière on peut produire aisément des pressions de 40 ou 50 atmosphères. De plus, on peut refroidir l'une des extrémités du tube, pour ajouter le refroidissement à la compression.

Le tableau suivant contient, dans la première colonne, les noms des gaz liquéfiés ; dans la deuxième, les diverses températures auxquelles les liquides ont été soumis ; et dans la troisième, les tensions correspondantes exprimées en atmosphères. Ces tensions ne peuvent être considérées que comme des premières approximations que des expériences plus précises devront sans doute modifier.

*Tableau de la liquéfaction des gaz.*

| NOMS DES GAZ LIQUÉFIÉS. | TEMPÉRATURES en degrés centigrades. | TENSIONS des liquides exprimées en atmosphères. |
|---|---|---|
| Acide sulfureux. . . . . . . . . | + 7 | 2 |
| Cyanogène. . . . . . . . . . . | + 7 | 3,6 |
| Chlore. . . . . . . . . . . . | +15,5 | 4 |
| Ammoniaque. . . . . . . . . . | 0 | 5 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . | +10 | 6,5 |
| Hydrogène sulfuré. . . . . . . | —16 | 14 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . | +10 | 17 |
| Acide muriatique. . . . . . . . | —16 | 20 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . | — 4 | 25 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . | +10 | 40 |
| Acide carbonique. . . . . . . . | —11 | 20 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . | 0 | 36 |
| Oxide nitreux. . . . . . . . . | 0 | 44 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . | + 7 | 51 |

Les autres gaz ont été soumis à des expériences analogues, sans qu'on ait pu jusqu'à présent parvenir à les liquéfier.

Cependant il n'y a aucun doute qu'ils ne puissent, par leur nature, prendre aussi l'état liquide. Dans les nouveaux essais que l'on pourra tenter sur ce sujet, on se donnera des chances de succès, en produisant des froids de plus en plus vifs. Car tout annonce qu'une différence d'un seul degré de chaleur peut produire des différences de tension de plusieurs atmosphères.

## CHAPITRE III.

*Des vapeurs mélangées avec les gaz.*

234. Les liquides qui ne se combinent pas chimiquement peuvent bien être mêlés pendant quelques instans, mais il se séparent peu à peu et se dégagent l'un de l'autre pour se superposer dans l'ordre de leurs densités, comme l'huile se superpose sur l'eau. Si les gaz et les vapeurs avaient des propriétés pareilles, tout serait changé sur la terre : on verrait, par exemple, les vapeurs qui se forment à la surface des eaux s'élever comme des ballons, en vertu de leur légèreté spécifique, et, poussées de la sorte jusqu'aux dernières couches de l'atmosphère, elles en sortiraient par leur élasticité pour se répandre de toutes parts dans le vide. L'évaporation étant continuelle, cette ascension se renouvellerait sans cesse ; à la fin, les lacs et les bassins des mers seraient à sec, et toutes les eaux de la terre seraient suspendues au dessus de l'atmosphère. Il est donc visible que les fluides élastiques, dans leurs mélanges, n'obéissent pas, comme les liquides, aux lois de la densité. Cette vérité fondamentale a été mise hors de doute par une expérience directe. Berthollet avait fait descendre dans les caves de l'Observatoire deux ballons séparés par un robinet, l'un était plein d'hydrogène et l'autre d'acide carbonique, à la même pression ; après les avoir disposés, l'hydrogène en haut et l'acide carbonique en bas, on attendit longtemps avant de tourner le robinet pour établir la communication. Les deux gaz étaient certainement à la même température, dans le repos le plus absolu et à l'abri de toute agitation ; cependant le mélange se fit assez promptement :

la moitié de l'hydrogène, malgré sa légèreté, descendit dans le ballon inférieur, et la moitié de l'acide carbonique, malgré sa densité, s'éleva dans le ballon supérieur. Ainsi, chacun des gaz pénétra l'autre et s'étendit, par sa force expansive, pour occuper tout l'espace qui lui était offert; en doublant de volume, chacun prit une élasticité moitié; mais l'élasticité totale resta la même, c'est-à-dire égale à la somme des élasticités partielles. Ce qui arrive pour deux gaz mélangés arrive pour un plus grand nombre, et le principe général du mélange des fluides élastiques est le suivant : *Lorsqu'on accumule dans le même espace divers fluides élastiques, qui sont sans action chimique, chacun se répand dans toute l'étendue de cet espace, et l'élasticité du mélange est égale à la somme des élasticités que prendrait chacun des fluides s'il était seul.* Cette vérité peut être constatée pour les vapeurs, au moyen de l'appareil suivant. T (*Fig.* 202) est un tube large et gradué, portant à chaque extrémité un robinet en fer; le robinet supérieur s n'est pas *percé* de part en part, il est seulement *creusé*, et s'appelle, pour cette raison, *robinet à capsule*. A sa partie inférieure, le tube T communique au tube *t*, qui est plus long et plus étroit, l'on peut enlever le robinet supérieur pour faire passer dans l'appareil un courant d'air sec; alors on remet le robinet, on verse du mercure par la branche ouverte, on incline plus ou moins pour faire sortir l'air excédant, et l'on arrive aisément à avoir, dans le grand tube T, de l'air sec, qui se trouve sous la pression atmosphérique. Ensuite on met un liquide au dessus du robinet à capsule, l'on tourne ce robinet toujours dans le même sens, pour faire tomber le liquide goutte à goutte, et l'on observe les phénomènes suivans. On voit le mercure baisser peu à peu, et, en même temps, on voit la couche liquide diminuer d'épaisseur; donc la vapeur se forme dans l'air et elle se forme lentement; ce qu'on pourrait conclure aussi des évaporations qui se font librement dans l'atmosphère. Mais, ce qui

est curieux à observer, c'est que cette vapeur a un maximum de tension, et un maximum qui est dans l'air exactement le même que dans le vide. En effet, si l'on verse du mercure par la branche ouverte, pour ramener le mélange gazeux à son volume primitif, on voit que sa force élastique est plus grande qu'elle n'était d'adord, d'une quantité qui est précisément égale à la tension maximum de la vapeur, pour la température où l'on opère. On arrive encore à la même conclusion, lorsqu'on fait passer le mélange d'air et de vapeur à des pressions plus fortes, en versant une nouvelle quantité de mercure par la petite branche, ou, lorqu'on le fait passer à des pressions plus faibles en ouvrant le robinet, pour laisser sortir du mercure. Dans tous les cas, en tenant compte des variations de volume que l'air éprouve, on voit que, constamment, la force élastique du mélange est la somme des forces élastiques de l'air et de la vapeur.

La vapeur, mélangée avec un autre fluide élastique, se condense, par deux causes, comme la vapeur isolée dans le vide; savoir, par un excès de pression ou par un abaissement de température. Ainsi, l'air atmosphérique étant toujours humide, surtout dans les bases régions qui avoisinent la terre, si l'on prend, par exemple, un litre d'air à la température de 20°, sous la pression ordinaire de 760 millimètres, et que la vapeur, pour sa part, supporte 10 millimètres de cette pression, l'espace ne sera pas saturé d'humidité, mais en comprimant ce mélange gazeux, on augmentera la tension de la vapeur aussi bien que celle de l'air, et on les augmentera proportionnellement jusqu'à ce que la vapeur atteigne sa tension maximum; alors, si on exerce une compression plus grande, la vapeur sera condensée en partie et se déposera sous forme de rosée sur les parois du vase. De même, en reprenant le même litre d'air, si on le refroidissait au lieu de le comprimer, on verrait encore la vapeur se condenser, et au même degré de refroidissement que si

elle était seule et sans mélange d'aucun gaz. En généralisant ces conséquences, on voit que, dans un espace donné, dans un litre, par exemple, on peut renfermer autant de substances gazeuses que l'on voudra, sans que ces substances se gênent l'une l'autre; il faudra seulement exercer une pression égale à la somme des pressions que chacune d'elles peut supporter. Et si un tel mélange était soumis à des pressions croissantes ou à des degrés de froid de plus en plus intenses, il présenterait des phénomènes curieux par la liquéfaction successive des divers élémens, qui s'arrangeraient ensuite suivant l'ordre de leur densité.

Les mélanges gazeux présentent une question théorique très-importante, c'est la question de savoir si les molécules de diverses natures exercent une pression l'une sur l'autre; si, par exemple, les molécules d'air pressent les molécules de vapeur d'eau, et réciproquement. Tout semble indiquer qu'il n'y a de réaction mutuelle qu'entre les molécules de même espèce; cependant nous verrons, en étudiant la propagation du son dans les mélanges de cette nature, qu'il y a une communication uniforme du mouvement vibratoire, qui suppose une action à distance entre toutes les molécules sans distinction.

Pour compléter ces notions générales, nous indiquerons plusieurs problèmes qui peuvent se présenter dans la pratique.

1°. Etant donné un vase *inextensible*, contenant un volume v de gaz, qui exerce une pression P contre les parois, on demande quelle pression il exercera si l'on y fait passer un liquide dont la vapeur sature l'espace avec une tension maximum représentée par F.

La pression deviendra évidemment P + F.

2°. Etant donné un vase indéfiniment *extensible*, contenant un volume v de gaz, sous une pression *p*, déterminer le volume qu'il prendra si l'on y fait passer un liquide dont la vapeur sature l'espace avec une tension maximum

représentéee par $f$. On suppose que ni la pression extérieure $p$, ni la température ne changent pendant cette expérience.

A mesure que la pression intérieure augmente par la formation de la vapeur, elle diminue par l'expansion du gaz; et comme elle doit, pour l'équilibre, rester égale à la pression extérieure $p$, il faudra, puisque la vapeur supporte $f$ pour sa part, que le gaz supporte $p-f$; donc le le volume v s'accroîtra au point de devenir $\frac{\text{v}p}{p-f}$.

5°. Un mélange gazeux a une force élastique $p$ à la température $t$; il prend une force élastique $p'$ à la température $t'$, sans que son volume change sensiblement; on demande s'il s'est formé des vapeurs ou s'il s'en est précipité, et quel est le point d'ébullition du liquide qui a donné naissance à ces vapeurs, s'il y en a.

S'il n'y avait aucune vapeur de développée ou de condensée, la pression deviendrait $p\,\frac{(1+at')}{1+at}$,

ainsi, $p'-p\,\frac{(1+at')}{1+at}$ sera la force élastique de la vapeur perdue ou gagnée.

Supposant que la vapeur est au maximum de tension et voyant quelle est sa force élastique entre les températures $t$ et $t'$, on peut, d'après la loi de Dalton, trouver son point d'ébullition.

## CHAPITRE IV.

### *De l'Ébullition et de l'Évaporation.*

235. La transformation des liquides en fluide élastique s'appelle en général *vaporisation.* Les liquides se vaporisent par *ébullition*, c'est-à-dire quand les vapeurs se forment au sein de la masse ; et par *évaporation*, c'est-à-dire quand elles se forment à la surface.

236. Lorsqu'on observe l'ébullition d'un liquide, on ne voit en général qu'un mouvement plus ou moins rapide qui mêle toutes les parties de la masse, et qui les agite dans tous les sens; mais quand on excite l'ébullition dans un vase de verre, on aperçoit la cause toujours changeante qui produit les mouvemens. On reconnaît que des bulles de vapeur se forment sur les parois échauffées du vase, qu'elles s'élèvent en vertu de leur légèreté, et qu'elles viennent éclater à la surface; elles sont d'abord petites au moment où elles se forment, mais elles prennent du volume à mesure qu'elles s'élèvent, et celles qui partent des points du vase les plus chauds sont celles qui se succèdent avec le plus de rapidité. Pour que ces bulles puissent se former et s'élever au milieu de la masse liquide qui les presse de toutes parts, il faut évidemment que la vapeur dont elles se composent ait une tension égale à la pression environnante ; et c'est là ce qui détermine les points d'ébullition des différens liquides et aussi les points d'ébullition du même liquide soumis à des pressions différentes. Ainsi la première condition de l'ébullition est que la tem-

pérature soit assez haute pour que la force élastique de la vapeur puisse vaincre toutes les pressions qui se font sentir dans la masse liquide. La seconde condition, comme nous l'avons déjà vu (145), est que la vapeur trouve à absorber le calorique latent, qui est nécessaire à sa formation.

De la première condition il résulte que tout ce qui fait varier la pression du liquide ou la tension de la vapeur, fait changer aussi le point d'ébullition; et il résulte de la seconde que la rapidité de l'ébullition dépend seulement de la quantité de chaleur qui est fournie aux parois extérieures du vase dans un temps donné, et qui peut passer de là aux parois intérieures, et ensuite à la portion du liquide qui se vaporise. Ces deux conséquences exigent quelques développemens.

237. *Du point d'ébullition.* — Les causes qui peuvent faire varier le point d'ébullition d'un même liquide sont: 1° la pression qui s'exerce à sa surface; 2° sa cohésion; 3° la nature du vase qui le contient; 4° la profondeur de sa masse; 5° les substances qu'il peut tenir en dissolution.

Au niveau de la mer, sous la pression ordinaire de 760^mm, l'eau bout à 100°; au sommet du Mont-Blanc, dont la hauteur est de 4775 mètres, et où la pression atmosphérique est d'environ 417^mm, l'eau doit entrer en ébullition à la température pour laquelle la tension est 417^mm, c'est-à-dire à 84° environ. Si l'on pouvait s'élever plus haut, la pression devenant moindre, l'ébullition se ferait à une température encore plus basse. En général, connaissant le tableau de la tension de la vapeur d'un liquide, son point d'ébullition *sous une pression donnée* sera facile à trouver, puisqu'il sera toujours le degré de chaleur qui donne à la vapeur une tension maximum capable de vaincre cette pression. Réciproquement on pourra faire bouillir un liquide à une température donnée,

puisqu'il suffira toujours de diminuer la pression au point qu'elle soit moindre que la tension du liquide pour cette température.

Par exemple, sous une pression de $30^{mm}$, l'eau doit bouillir à 30°, puisque à cette température la tension de l'eau est un peu plus grande que $30^{mm}$; sous une pression de $10^{mm}$ l'eau doit bouillir à 11°, et sous une pression de $5^{mm}$ l'eau doit bouillir à 0. Ces conséquences se vérifient facilement de la manière suivante : on met de l'eau à 30°, dans un vase en verre sous le récipient de la machine pneumatique, et après quelques coups de piston, quand l'éprouvette ne marque plus que $30^{mm}$ de tension, l'ébullition commence avec une grande force, comme si l'eau était sur un feu très-vif, et soumise à la pression de l'air. Cette ébullition cesse bientôt, parce que la vapeur remplit le récipient et presse la surface liquide, mais par de nouveaux coups de piston, on enlève la vapeur comprimante, et on fait recommencer l'ébullition. Avec nos machines ordinaires il serait impossible de faire bouillir de l'eau à 0, puisqu'il serait impossible de maintenir le vide à $5^{mm}$, à cause de la vapeur qui s'exhale sans cesse de la surface du liquide.

L'appareil qui est représenté *Fig.* 215 montre ces phénomènes d'une manière encore plus frappante. C'est un ballon à long col B, fermé par un bouchon *b*. Ce ballon est à moitié plein d'eau ; on le met en pleine ébullition ; et quand tout l'air est chassé on met le bouchon *b* ; ensuite on le retourne dans la position que représente la figure. Lorsqu'il est à la température ambiante, on n'observe pas la moindre trace d'ébullition, et cela est tout simple ; mais si l'on verse à la partie supérieure, de l'eau plus refroidie, alors l'ébullition se manifeste à l'instant avec beaucoup de force. L'eau froide fait bouillir l'eau du ballon, parce qu'elle condense la vapeur et diminue la pression qui s'exerçait sur le liquide. On peut même se donner ainsi le spectacle d'une ébullition sans feu qui dure des heures entières ;

il suffit pour cela de faire chauffer l'eau du ballon à 100° ou à peu près, le refroidissement naturel qui se fait à la partie supérieure opère dans la vapeur une assez grande condensation pour déterminer l'ébullition.

La variation du point d'ébullition a aussi été vérifiée par des expériences directes sur les lieux élevés, dans les Alpes, dans les Pyrénées et sur d'autres montagnes.

L'eau bouillante n'est donc pas également chaude dans tous les lieux de la terre, et par conséquent elle n'est pas également propre aux usages domestiques et à la préparation des alimens. A Quito, par exemple, l'eau bout à 90°, et cette température est beaucoup trop basse pour cuire beaucoup de substances qui peuvent être cuites à 100°. Le tableau suivant contient des points d'ébullition de l'eau dans plusieurs lieux habités, dont les hauteurs sont bien connues.

| NOMS DES LIEUX. | HAUTEUR au dessus de l'Océan. | HAUTEUR moyenne du barom. | DEGRÉ d'ébullit. de l'eau. |
|---|---|---|---|
| | mèt. | mm. | deg. |
| Métairie d'Antisana | 4101 | 454 | 86,3 |
| Ville de Micuipampa (Pérou) | 3618 | 483 | 87,9 |
| Ville de Quito | 2908 | 527 | 90,1 |
| Ville de Caxamarca (Pérou) | 2860 | 531 | 90,3 |
| Santa-Fé de Bogota | 2661 | 544 | 90,9 |
| Ville de Cuença (province de Quito) | 2633 | 546 | 91,0 |
| Mexico | 2277 | 572 | 92,3 |
| Hospice du Saint-Gothard | 2075 | 586 | 92,9 |
| Village de Saint-Véran (Alpes-Marit.) | 2040 | 588 | 93,0 |
| Village de Breuil (vallée du Mont-Cervin) | 2007 | 591 | 93,1 |
| Village de Maurin (Basses-Alpes) | 1902 | 599 | 93,5 |
| Village de Saint-Remi | 1604 | 621 | 94,5 |
| Village de Heas (Pyrénées) | 1465 | 632 | 94,9 |
| Village de Gavarnie (Pyrénées) | 1444 | 634 | 95,0 |
| Briançon | 1306 | 645 | 95,5 |
| Village de Barége (Pyrénées) | 1269 | 648 | 95,6 |
| Palais de Sainte-Ildefonse (Espagne) | 1155 | 657 | 96,0 |
| Bains du Mont-d'Or (Auvergne) | 1040 | 667 | 96,5 |
| Pontarlier | 828 | 685 | 97,1 |
| Madrid | 608 | 704 | 97,8 |

| NOMS DES LIEUX. | HAUTEUR au-dessus de l'Océan. | HAUTEUR moyenne du barom. | DEGRÉ d'ébullit. de l'eau. |
|---|---|---|---|
| | mèt. | mm. | deg. |
| Inspruck | 566 | 708 | 98,0 |
| Munich | 538 | 710 | 98,1 |
| Lausanne | 507 | 713 | 98,3 |
| Augsbourg | 475 | 716 | 98,4 |
| Salzbourg | 452 | 718 | 98,4 |
| Neufchâtel | 438 | 719 | 98,5 |
| Plombières | 421 | 721 | 98,5 |
| Clermont-Ferrand (préfecture) | 411 | 722 | 98,5 |
| Genève et Freyberg | 372 | 725 | 98,6 |
| Ulm | 369 | 726 | 98,7 |
| Ratisbonne | 362 | 726 | 98,7 |
| Moscou | 300 | 732 | 99,0 |
| Gotha | 285 | 733 | 99,0 |
| Turin | 230 | 738 | 99,1 |
| Dijon | 217 | 740 | 99,2 |
| Prague | 179 | 743 | 99,3 |
| Mâcon (Saône) | 168 | 744 | 99,4 |
| Lyon (Rhône) | 162 | 745 | 99,4 |
| Cassel | 158 | 745 | 99,4 |
| Gottingue | 134 | 747 | 99,5 |
| Vienne (Danube) | 133 | 747 | 99,5 |
| Milan (Jardin botanique) | 128 | 748 | 99,5 |
| Bologne | 121 | 749 | 99,5 |
| Parme | 93 | 751 | 99,6 |
| Dresde | 90 | 752 | 99,6 |
| Paris (Observatoire royal, 1er étage) | 65 | 754 | 99,7 |
| Rome (Capitole) | 46 | 756 | 99,8 |
| Berlin | 40 | 756 | 99,8 |

Dans un même lieu le baromètre éprouvant des variations continuelles, il en résulte que le point d'ébullition change à chaque instant. Pour Paris les hauteurs extrêmes du baromètre observées depuis dix ans ayant été $719^{mm}$ et $781^{mm}$, on voit que le plus haut degré d'ébullition, correspondant à $781^{mm}$ a été d'environ $100^{o},8$, et le plus bas, correspondant à 719, d'environ $98^{o},5$. Il est facile de voir comment on doit tenir compte de la hauteur du baromètre au moment où l'on marque le point d'ébullition sur l'échelle d'un thermomètre.

Le révérend F. J. H. Wollaston a construit un thermo-

mètre très-sensible, marquant seulement les degrés qui avoisinent le point d'ébullition, et au moyen duquel on peut constater la différence de température entre l'eau qui bout à un étage et celle qui bout à l'étage supérieur. La construction de ce thermomètre exige beaucoup de précautions; mais ce qu'il y a d'essentiel, c'est que chaque degré y occupe une longueur de trente millimètres au moins.

Lorqu'on augmente la pression au lieu de la diminuer, on retarde l'ébullition, et on peut la retarder indéfiniment en augmentant indéfiniment la pression. C'est ainsi que dans l'appareil si connu sous le nom de *marmite à Papin* ou de *digesteur de Papin*, on peut élever l'eau jusqu'aux plus hautes températures sans la faire bouillir. Cet appareil n'est autre chose qu'un vase cylindrique en bronze ou en fer, dont les parois sont capables d'une grande résistance. L'ouverture en est petite, et on la ferme avec une soupape sur laquelle on met des poids de manière à produire une pression de quarante ou cinquante atmosphères suivant la force des parois. L'ébullition est impossible, puisque la vapeur qui se forme au dessus du liquide exerce une pression toujours suffisante pour l'empêcher; mais lorsqu'on ouvre la soupape l'eau s'élance en vapeur avec une telle impétuosité qu'elle forme un jet de vingt ou trente pieds de hauteur: en même temps le vase est fort refroidi à cause de la chaleur qu'il a dû fournir à l'eau pour sa vaporisation.

Le digesteur fut inventé par Papin, vers le milieu du dix-septième siècle; il servit alors à une foule d'expériences curieuses, soit pour montrer la puissance mécanique de la vapeur, soit pour montrer la puissance dissolvante de l'eau, maintenue liquide à des températures plus hautes que 100°. Ce ne fut pas sans un grand étonnement que l'on vit alors la possibilité d'extraire des os une substance nutritive aussi bonne et presque aussi abondante que celle qui se tire des parties musculaires les plus succulentes.

L'*autoclave* est un appareil de même genre que le digesteur de Papin; il en diffère seulement par une ingénieuse modification. Outre l'ouverture de la soupape, qui est toujours très-petite, l'autoclave porte une autre ouverture, de grandeur arbitraire et de forme essentiellement *elliptique ;* par l'avantage de cette forme, le couvercle, quoique plus large, peut être mis en dedans; alors c'est la tension de la vapeur qui le presse contre les parois; ainsi l'appareil se *ferme de lui-même*, et se ferme d'autant mieux que la tension est plus forte.

Si l'eau n'est pas hermétiquement enfermée dans une chaudière, et s'il se trouve quelque issue par où la vapeur puisse s'échapper, le point d'ébullition dépend alors de la grandeur de l'ouverture, comparée à la surface de l'eau qui reçoit l'action du feu. Voici un tableau des températures approchées que peut prendre l'eau dans ces circonstances sous la pression ordinaire :

| Température que prend l'eau dans la chaudière. | Rapport de la surface de l'orifice à la surface de l'eau qui reçoit le feu. |
|---|---|
| 100° | $\frac{1}{1000}$ et au dessus. |
| 105 | $\frac{1}{5000}$ |
| 115 | $\frac{1}{10000}$ |
| 138 | $\frac{1}{20000}$ |

Il paraît que, dans le même temps, la quantité de vapeur qui sort par chacune de ces ouvertures est à peu près la même. Ainsi, en 1', le poids d'eau vaporisée qui s'élève d'une chaudière tout-à-fait ouverte à 100° de température, serait à peu près le même que le poids d'eau vaporisée qui jaillirait de la même chaudière à 138°, par une ouverture dont la surface serait $\frac{1}{20000}$ de celle de l'eau qui reçoit le feu.

2°. La cohésion du liquide peut avoir une influence pour

modifier ce principe, qu'à la température de l'ébullition la force élastique de la vapeur est égale à la pression de l'air. En effet, les petites bulles de vapeur ne pouvant se former sans écarter les molécules qui les environnent, on conçoit qu'à leur naissance elles ont à rompre la cohésion du liquide et à vaincre la pression extérieure. Or, si la cohésion est une résistance sensible, il faudra que la force élastique de la vapeur soit capable de l'emporter sur ces deux forces réunies, c'est-à-dire qu'elle soit plus grande que la pression, de toute la force qui résulte de la cohésion. Mais les bulles une fois formées, l'effet de la cohésion devient moindre, et la vapeur éprouve une sorte de détente qui augmente brusquement son volume. Ainsi, par cette cause, l'ébullition est retardée, et de plus elle est forcée de se faire par *soubresauts* et par mouvemens saccadés.

3°. La nature du vase a une influence sur le point d'ébullition. M. Gay-Lussac a observé que l'eau, par exemple, bout plus tard dans le verre que dans le métal, et il en attribue la cause à l'action moléculaire qui s'exerce alors entre le solide et le liquide, action qui est toute pareille à la cohésion, et qui produit des résultats analogues. Une tige métallique plongée dans le liquide, ou du métal en poudre jeté au fond d'un vase en verre suffisent pour ramener le point d'ébullition à ce qu'il serait dans un vase en métal. Cette précaution remédie aussi à un autre inconvénient: elle empêche les secousses et les *soubresauts*, qui projettent le liquide et qui souvent même font éclater le vase.

4°. Dans une masse liquide très-profonde, outre la pression qui s'exerce à la surface, les molécules du fond supportent encore toute la pression due à la colonne liquide supérieure. Ainsi, dans une chaudière pleine d'eau, de trente-deux pieds de profondeur, les couches du fond supportent deux atmosphères, et par conséquent, les bulles de vapeur ne peuvent s'y former, à moins que la température ne soit de 121°; c'est donc là le point d'ébullition de l'eau

pour cette profondeur. Mais les couches superficielles ne pouvant être qu'à 100°, il arrive que les couches du fond s'élèvent sans cesse, à cause de leur dilatation; qu'elles forment des bulles de vapeur à cause de l'abaissement de la pression, et, par conséquent, qu'elles se refroidissent, et passent successivement par toutes les températures, depuis 121° jusqu'à 100°. Dans les vases qui n'ont même que quelques pouces de profondeur, il se produit un phénomène analogue, avant que l'ébullition ne commence. Les couches du fond prennent aux parois du vase assez de chaleur pour se vaporiser, de petites bulles se forment et s'élèvent, mais en gagnant les couches supérieures qui sont encore trop froides, elles se condensent subitement. De là ce bruit singulier qui précède de quelques instans l'ébullition des liquides. On s'en assure aisément en faisant l'expérience dans des ballons verre, car on voit les bulles se former, s'élever un peu, et disparaître tout-à-fait.

5°. Le point d'ébullition d'un liquide n'est pas changé par les corps étrangers qui sont mécaniquement suspendus dans sa masse, comme les parcelles de sable dans l'eau; mais il est toujours changé par les corps qui sont chimiquement combinés aves sa substance. Tous les sels solubles, par exemple, retardent le point d'ébullition de l'eau; et un phénomène digne de remarque, c'est que la vapeur que donnent ces dissolutions est de la vapeur d'eau parfaitement pure, sans aucune trace des substances dissoutes. Voici les points d'ébullition de quelques dissolutions saturées.

| | |
|---|---|
| Sel ordinaire. . . . . . . . . | 109° |
| Muriate d'ammoniaque. . . . | 114,4 |
| Nitre . . . . . . . . . . . . . | 115,6 |
| Tartrate de potasse. . . . . . | 116,7 |
| Nitrate d'ammoniaque. . . . | 125,3 |
| Sous-carbonate de potasse.. . | 140,0 |

Ainsi, dans la dissolution de sel ordinaire, par exemple, la vapeur qui se forme pendant l'ébullition est à la tempé-

rature de 109°, et sous la pression de 760; c'est-à-dire que sa tension n'est pas au maximum, ou plutôt sa tension est un maximum dépendant de son contact avec la dissolution et moindre que le maximum absolu. Il résulte de là une propriété qui est souvent utile dans les arts, c'est qu'avec de la vapeur d'eau à 100° on peut produire une température beaucoup plus haute que 100°; car, si l'on fait arriver un courant de vapeur d'eau dans une dissolution de sous-carbonate de potasse à 100°, la vapeur y sera condensée et y déposera son calorique latent, jusqu'à ce que la température de la dissolution arrive à 140°, puisqu'à ce terme seulement la force élastique de la vapeur qui arrive pourra être balancée et arrêtée par la face élastique de la vapeur qui se dégage.

Lorsqu'un liquide est combiné avec un autre liquide plus ou moins volatil que lui, il y a encore changement dans le point d'ébullition; mais alors la vapeur qui se forme est un mélange en diverses proportions des vapeurs des deux liquides. Ainsi, l'alcool avance le point d'ébullition de l'eau; l'acide sulfurique le retarde, et dans les deux cas, les vapeurs sont simplement mélangées, quoique les liquides soient chimiquement combinés.

237. *De la rapidité de l'ébullition.*—La quantité de vapeur qui se forme par ébullition dépend de la quantité de chaleur que reçoit le liquide dans un temps donné; et cette quantité de chaleur dépend : 1° de l'activité du foyer; 2° de la nature et de l'épaisseur des parois de la chaudière; 3° de l'étendue de la surface liquide qui reçoit l'action du feu.

1°. L'activité du foyer dépend de la disposition du fourneau et surtout de la nature du combustible; car le bois, le charbon, la tourbe, la houille et l'anthracite ne donnent pas, à poids égal, la même quantité de chaleur, et ils ne sont pas non plus capables de produire la même température.

2°. La surface extérieure de la chaudière peut être plus ou moins propre à recevoir l'action du feu, et à absorber la chaleur qui la frappe, et nous verrons aussi que la nature des parois et leur épaisseur ont une influence considérable sur la quantité de chaleur qui peut les traverser dans un temps donné.

3°. L'eau qui reçoit l'action du feu est celle qui touche les parois échauffées de la chaudière, et si chaque partie de ces parois fournit la même quantité de chaleur, il est évident que l'eau vaporisée dans un temps donné est proportionnelle à l'étendue de la chaudière que peut frapper la flamme. C'est ce qui est en effet confirmé par quelques expériences, dont la précision est au moins suffisante pour la pratique; il paraît que dans les circonstances les plus favorables, avec un feu aussi vif qu'il soit possible, chaque centimètre carré de la surface *de chauffe* peut vaporiser dix grammes d'eau en une heure, ou chaque mètre carré 100 kilogrammes ou 100 litres; mais dans l'usage ordinaire, le feu étant moins vif et moins soutenu, on n'obtient guère en une heure que la moitié ou le tiers de ce résultat, c'est-à-dire environ 4 à cinq grammes par centimètre carré, ou 40 à 50 litres par mètre carré. On comprend assez combien cette donnée est importante dans les arts, puisque c'est par elle qu'on peut juger d'avance des dimensions qu'il convient de donner aux chaudières à vapeur. On saura, par exemple, que, si une chaudière doit vaporiser 500 litres d'eau par heure, il faut la disposer dans le fourneau pour que 10 mètres carrés de la surface, au moins, soient directement frappés par la flamme.

238. *Table des points d'ébullition de divers liquides.*

| | Degrés. | |
|---|---|---|
| Éther sulfurique. . . . . . . . . . . | 37,8 | Gay-Lussac. |
| Soufre carboné. . . . . . . . . . . . | 47,0 | *Idem.* |
| Alcool. . . . . . . . . . . . . . . . | 79,7 | *Idem.* |
| Dissolution saturée de sulfate de soude. | 100,7 | *Idem.* |
| Dissolution d'acétate de plomb. . . . . | 102 | *Idem.* |
| Dissolution de muriate de soude. . . . | 106,9 | *Idem.* |
| Huile de térébenthine. . . . . . . . . | 157 | |
| Phosphore. . . . . . . . . . . . . . | 290 | |
| Soufre. . . . . . . . . . . . . . . . | 299 | |
| Acide sulfurique. . . . . . . . . . . | 310 | |
| Huile de lin. . . . . . . . . . . . . | 316 | |
| Mercure. . . . . . . . . . . . . . . | 350 | |

239. Plusieurs liquides, mis en contact avec une surface chauffée jusqu'au rouge blanc, présentent ce phénomène singulier, qu'au lieu de s'agiter et de bouillir vivement, ils se tiennent en repos et conservent leur volume, à peu près comme si la température était insuffisante pour l'ébullition. Pour en faire l'expérience sur de petites masses, on fait chauffer un creuset de verre ou de métal, et ensuite on y laisse tomber quelques gouttes d'eau; ce liquide s'arrondit alors comme le mercure sur le verre; il reste en repos pendant long-temps, ou bien il tourne sur lui-même d'un mouvement très-rapide; l'ébullition est nulle et la diminution de volume insensible. Mais si l'on retire le creuset pour qu'il se refroidisse, il arrive un moment, près de la température du rouge brun, où tout à coup le liquide bout avec violence et se trouve projeté de toutes parts. L'eau chargée d'un alcali ou de quelques sels solubles devient incapable de produire ce phénomène; elle entre alors en ébullition dans un creuset rouge-blanc, comme dans un creuset qui est chaud, sans être rouge. Cette propriété se manifeste encore dans d'autres circonstances et sur des

masses plus considérables : par exemple, une marmite à Papin assez forte pour supporter la température rouge sans explosion, pourrait alors être débouchée sans donner naissance à un jet de vapeur considérable. Ce résultat s'est présenté dans les *générateurs* de la machine à vapeur de Perkins. A la température rouge, on peut les percer de plusieurs ouvertures sans que la vapeur s'échappe, mais à une température plus basse la vaporisation s'opère et la vapeur s'élance avec une grande impétuosité. On pense en général que ce phénomène résulte d'une couche de vapeur qui se forme au contact de la surface métallique, et qui empêche la chaleur de passer du métal au liquide; car il est évident que le liquide ne s'échauffe pas assez pour bouillir. Il se pourrait bien aussi que la chaleur pût alors traverser le liquide sans l'échauffer. Quoi qu'il en soit, cette propriété est fort curieuse, et mérite de nouvelles recherches.

240. *De l'évaporation.*—L'*évaporation* est la formation de la vapeur à la surface libre des liquides, tandis que l'ébullition est, comme nous venons de le voir, la formation de la vapeur dans le sein de la masse. L'eau s'évapore à la surface des rivières, des lacs et des mers; elle s'évapore à la surface de la terre, sur le sol et sur les plantes; et il est évident qu'elle n'a pas alors une force élastique capable de vaincre la pression de l'air. Ainsi, les observations les plus communes nous font voir que la vapeur se forme sur l'eau à toutes températures, et qu'elle s'exhale dans l'air avec les plus faibles tensions. On avait d'abord présumé qu'une affinité chimique était nécessaire entre les molécules d'air et de vapeur pour que ce phénomène pût se produire; mais nous avons vu qu'il n'est nul besoin de recourir aux forces chimiques : la vapeur, quelque faible que soit sa tension, se mélange avec l'air, comme deux gaz se mélangent entre eux. La seule condition pour qu'un liquide s'évapore est donc que les couches d'air qui l'environnent ne soient pas saturées de vapeur; et comme il arrive, dans le mélange de

deux gaz, que les molécules de l'un sont un obstacle mécanique à la diffusion des molécules de l'autre, il arrive aussi, dans l'évaporation, que l'air oppose une résistance à la diffusion de la vapeur. Ainsi, dans une atmosphère parfaitement calme, l'évaporation est lente, tandis que dans une atmosphère agitée elle devient de plus en plus rapide, à cause que les couches non saturées sont sans cesse ramenées en contact avec le liquide. Un vent sec animé d'une vitesse infinie, en soufflant sur la surface d'un lac, y produirait une évaporation aussi instantanée que celle qui se produirait dans un vide infini, car les molécules de vapeur seraient emportées si vite qu'elles ne pourraient exercer aucune pression sur les molécules d'eau, pour les empêcher de se vaporiser à leur tour.

La rapidité de l'évaporation n'est pas seulement dépendante de l'agitation de l'air; elle dépend aussi de la tension de la vapeur, ou plutôt de la différence qui existe entre la tension de la vapeur qui se forme et celle de la vapeur qui est déjà formée dans l'air. Il résulte des expériences de Dalton, sur ce sujet, que la quantité de liquide qui peut se vaporiser dans un temps donné, est toujours proportionnelle à cette différence de tension. Ainsi, dans un air parfaitement sec, à 11° de température, il se vaporiserait, à surface égale, autant d'eau à peu près qu'il s'en pourrait vaporiser à 50° dans un air humide, contenant de la vapeur à vingt millimètres de tension.

Il est à peine nécessaire de remarquer que, toutes les autres circonstances étant les mêmes, la quantité d'eau qui s'évapore dans un temps donné est proportionnelle à l'étendue de la surface sur laquelle la vapeur prend naissance.

Les autres liquides s'évaporent à l'air libre, d'après les mêmes principes que l'eau; on peut dire seulement que pour eux, la rapidité de l'évaporation est proportionnelle à la tension de la vapeur; car, en général, quand ils se vapo-

risent, il n'y a pas dans l'air de vapeur préexistante qui presse la surface liquide et retarde l'évaporation.

Nous verrons, dans la Météorologie, tous les phénomènes naturels qui résultent de la formation de la vapeur, de sa suspension dans l'atmosphère et de sa condensation sous forme de pluie, de rosée, de gelée, etc.

241. *Du froid produit par la vaporisation.*— Quand un liquide est en ébullition à l'air libre, il conserve une température fixe, parce qu'il reçoit du foyer, par les parois du vase, autant de calorique que la vapeur en absorbe pour se former; quand l'ébullition se fait sous le récipient de la machine pneumatique, la température s'abaisse graduellement, parce qu'alors c'est à la masse liquide et aux corps environnans que la vapeur doit prendre le calorique latent nécessaire à sa formation. Nous verrons plus loin qu'un gramme de vapeur d'eau, en se formant par ébullition ou par évaporation, absorbe une quantité de chaleur latente, capable d'élever de 1° la température de 550 grammes d'eau liquide; ainsi, on peut juger de la rapidité avec laquelle s'abaisse la température d'une masse liquide soumise à une ébullition spontanée ou à une prompte évaporation. Nous indiquerons les expériences les plus frappantes qui reposent sur ce principe.

*Congélation de l'eau dans le vide.*— On met sous le récipient de la machine pneumatique un large vase en verre, contenant de l'acide sulfurique; à quelques pouces au dessus on dispose une capsule de métal très-mince et très-évasée, contenant quelques grammes d'eau: ordinairement cette capsule est portée par trois fils ou par trois bandes de métal très-déliées, qui s'ajustent sur les bords du vase en verre. Après quelques coups de piston, l'eau entre en ébullition; en continuant de faire le vide, l'ébullition cesse, et quand le vide est fait aussi complètement que possible, on attend quelques minutes; des aiguilles de glace paraissent dans la capsule, et bientôt après toute l'eau qu'elle contient

ne forme plus qu'une masse solide. Cette expérience curieuse est due à Leslie. L'acide sulfurique absorbe la vapeur d'eau à mesure qu'elle se forme, et détermine ainsi une évaporation plus prompte. Tout corps puissamment absorbant produit le même effet; la farine d'avoine, un peu torréfiée, réussit parfaitement. La capsule est très-mince, parce qu'elle doit participer au refroidissement, et on l'isole des corps voisins pour qu'elle n'en reçoive pas la chaleur. On a employé ce procédé avec quelques modifications, mais avec peu de succès, pour fabriquer de la glace à Londres.

Une congélation, fondée sur les mêmes principes, peut se faire plus commodément avec l'appareil de la *figure* 203. La boule supérieure B est à moitié pleine d'eau, et le vide a été fait en scellant la boule inférieure B′ pendant l'ébullition. Pour congeler l'eau qui est en B, il suffit de plonger la boule B′ dans un mélange réfrigérant, ou bien de la refroidir elle-même par une autre évaporation, en l'arrosant avec un liquide très-volatil.

*Congélation du mercure.* — On peut pousser le refroidissement par évaporation au point de congeler le mercure. Pour cela on revêt d'une petite éponge ou de quelque tissu spongieux la boule d'un thermomètre et on l'humecte de carbure de soufre, ou, ce qui vaut mieux encore, d'acide sulfureux liquide; l'évaporation est si rapide et la quantité de chaleur enlevée si considérable que la colonne de mercure se précipite à — 10, — 20, — 30°, et au bout de quelques instans tout le mercure de la boule est congelé.

Le froid qui se fait sentir sur la main lorsqu'on y laisse tomber quelques gouttes d'un liquide volatil, et en général le froid qu'on observe à la surface des corps humides, sont des phénomènes résultant de la même cause.

Les *alcarazas* dont on se sert en Espagne et ailleurs pour rafraîchir l'eau et les boissons spiritueuses, sont des vases poreux qui offrent à l'évaporation une grande surface

humide. Le liquide intérieur s'infiltre à travers les parois ; il s'évapore promptement dans un air un peu agité, et cette action se renouvelant sans cesse, le vase et le liquide qu'il contient sont maintenus par là à une température de 10, 15 ou 20° au dessous de la température ambiante.

Par une raison semblable, les plantes doivent être en général à une température plus basse que celle de l'air, car leurs tissus extérieurs font plus ou moins l'office d'alcarazas.

La transpiration abondante, et l'exhalation qui se fait sans cesse à la surface des corps vivans, sont pareillement une cause de refroidissement : nous verrons plus loin, en parlant de la chaleur animale, que le sang des animaux à sang chaud a une température fixe, qui ne peut s'élever ou s'abaisser sans les plus graves inconvéniens, et qui ne peut varier de quelques degrés sans que la mort s'ensuive. Pour l'homme, quel que soit le climat qu'il habite, cette température fixe est de 37°. Ainsi, sous la zône torride, où l'air s'élève souvent à des températures de 50°, les hommes vivent dans cette atmosphère brûlante, sans participer à sa température; l'activité de la transpiration est sans cesse proportionnée à l'énergie de la chaleur, et ces causes contraires se balancent avec tant d'harmonie, que le sang d'un Nègre reste à peu près à 37°, comme le sang d'un Lapon.

FIN DE LA SECONDE PARTIE.

# TROISIÈME PARTIE.

## *De la communication du Calorique.*

### CHAPITRE PREMIER.

#### *De la Conducibilité.*

242. La *conducibilité* est la propriété dont jouissent les corps, d'absorber la chaleur et de la répandre dans leur masse. On distingue la *conducibilité extérieure* ou la *pénétrabilité*, et la *conducibilité propre* ou la *perméabilité*. Par sa pénétrabilité, un corps laisse le calorique passer de sa surface à la surface d'un corps contigu, ou *vice versâ*; par sa perméabilité, il laisse le calorique passer d'un point à un autre de sa masse. Par exemple, une barre de fer étant plongée par une de ses extrémités dans un bain de plomb fondu, on sait que la chaleur gagne peu à peu sur la longueur de la barre, et qu'à la fin elle se fait sentir jusqu'à une grande distance. Or la quantité de chaleur qui entre par une étendue donnée de la partie plongée, dépend de la pénétrabilité; et celle qui passe d'une section à la section suivante dépend de la pénétrabilité et de la perméabilité, car elle dépend des pertes qui se font à l'extérieur par la surface libre, et de la facilité avec laquelle le calorique se propage d'une molécule du fer à la molécule suivante.

243. *Conducibilité des solides.* — Lorsqu'une barre pris-

matique très-longue est plongée dans un bain de chaleur par une de ses extrémités, toutes ses sections, diversement éloignées du bain, prennent au dessus de l'air ambiant des températures différentes; et quand l'équilibre est établi, chacune ayant la chaleur qu'elle doit conserver, on observe cette loi remarquable, que *pour des distances au bain, croissant en progression arithmétique, les excès de température décroissent en progression géométrique.* Cette loi n'a été vérifiée que pour des températures qui n'étaient pas très-hautes. Pour comparer les conducibilités propres des diverses substances, on a coutume de les revêtir de quelques couches de vernis, afin de leur donner la même pénétrabilité; mais même avec ces précautions on n'atteint le but qu'imparfaitement, en sorte que les rapports de conducibilité propre auxquels on parvient ne sont que des approximations. C'est là l'idée qu'il faut attacher aux nombres contenus dans la table suivante :

| | |
|---|---|
| Or. . . . . . . . . . . . | 1000 |
| Argent. . . . . . . . . . | 973 |
| Platine. . . . . . . . . . | 981 |
| Cuivre. . . . . . . . . . | 898 |
| Fer . . . . . . . . . . . | 374 |
| Zinc. . . . . . . . . . . | 363 |
| Étain. . . . . . . . . . | 304 |
| Plomb . . . . . . . . . | 180 |
| Marbre. . . . . . . . . . | 24 |
| Porcelaine. . . . . . . | 12 |
| Terre des fourneaux. . . | 11 |

Ces nombres suffisent cependant pour montrer qu'entre les différens corps il y a une prodigieuse différence de conducibilité propre. Les métaux sont de *très-bons conducteurs* par rapport aux autres corps, et parmi eux l'or est le premier et le plomb le dernier; parmi les *mauvais conducteurs*, ceux qui paraissent les plus mauvais sont le verre et

surtout le charbon, dont les nombres proportionnels ne sont pas rapportés dans la table.

Lorsqu'on veut simplement constater l'inégale conducibilité des différens corps, on peut se servir de l'appareil d'Inghenouz. Cet appareil se compose d'une petite caisse en cuivre, sur un des côtés de laquelle on fixe perpendiculairement de petits cylindres de diverses substances de même diamètre dont chacun est recouvert d'une couche de cire. En versant dans la caisse de l'eau bouillante ou de l'huile très-chaude, la chaleur pénètre dans les cylindres et fait fondre la cire qui les recouvre; pour les uns, la cire fond jusqu'à une grande distance de la caisse, ce sont les meilleurs conducteurs; pour les autres, elle ne fond qu'à quelques lignes de distance, ce sont les mauvais conducteurs.

Tous les corps réduits en filamens très-fins ou en parcelles très-petites sont de mauvais conducteurs; ainsi le poussier de charbon, la brique pilée, le sable, le verre en poudre, tiennent très-bien la chaleur, de même que la laine, la soie, la plume, l'édredon, etc.

244. *Conducibilité des liquides.* — Les changemens de densité, qui accompagent les changemens de température, produisent dans les liquides des mouvemens continuels qui en mélangent toutes les parties; aussitôt que des molécules de la masse deviennent plus denses ou plus légères, elles tombent ou elles s'élèvent, et toutes les molécules qu'elles rencontrent participent plus ou moins à leurs températures et à leurs mouvemens. Ces phénomènes intérieurs des masses liquides peuvent être rendus sensibles par l'expérience suivante : on mêle dans de l'eau des parcelles visibles, ayant à peu près la même densité qu'elle, par exemple, de la sciure de chêne ou de buis, et ensuite on la fait chauffer ou refroidir dans une cloche à minces parois (*Fig.* 212). La température ambiante étant de 15 ou 20°, le refroidissement de la partie inférieure détermine des courans descendans contre les parois: et au milieu de la masse

un courant ascendant ; le refroidissement de la partie supérieure produirait le même effet. Au contraire, le réchauffement de la partie inférieure produit des courans ascendans contre les parois, et un courant descendant au milieu. Toute la masse participe bientôt à l'abaissement ou à l'élévation de température, et il est visible que c'est par mélange bien plus que par conducibilité. Cependant, si on échauffe la masse par le haut, les molécules réchauffées ayant la place qui convient à leur densité, nul mouvement ne se manifeste, et alors la question de la conducibilité se réduit à savoir si dans ce cas la couche supérieure seule se réchauffe, ou si la chaleur se propage de couche en couche à travers les molécules immobiles du liquide. Rumford attribait aux liquides une non-conducibilité absolue, et pour en donner la preuve, il faisait l'expérience suivante : Après avoir fait geler de l'eau au fond d'un vase en verre vv (*Fig.* 211) de manière à avoir une petite éminence de glace *e*, il versait un liquide dans le vase, et faisait descendre à une petite distance de la pointe de glace un cylindre *c* plus ou moins chaud. La chaleur du cylindre ne pouvait arriver à la glace que par la conducibilité à travers les couches liquides, et Rumford prétendait que la glace n'éprouve pas la moindre trace de fusion. Pendant toute l'expérience, le fond du vase vv doit plonger dans la glace fondante *ff*. Cependant, d'autres expériences indiquent dans les liquides une conducibilité certaine, et il faut bien qu'il en soit ainsi, car s'ils étaient absolument non conducteurs, ils ne pourraient pas se réchauffer même par l'agitation et par le mélange de toutes les parties.

La faible conducibilité des liquides se prouve encore par une autre expérience : on perce la paroi d'un vase en verre à quelques lignes au dessous du bord, pour y faire passer un petit thermomètre que l'on fixe horizontalement ; ensuite on remplit le vase, l'on verse encore au dessus du liquide une couche d'alcool ou d'éther, à laquelle on met le feu.

Pendant toute la combustion, qui dure plusieurs minutes, le thermomètre n'est séparé de la flamme que par une couche très-mince de liquide, et cependant il monte très-peu, son ascension peut même en grande partie être attribuée au calorique qui se communique par les parois du vase.

245. *Conducibilité des gaz.* — Les gaz étant plus dilatables encore et plus mobiles que ne sont les liquides, on conçoit que les changemens de température, dans quelques points de leur masse, y produisent des courans plus nombreux et des mouvemens plus rapides. Ainsi, la conducibilité des gaz est encore plus difficile à observer que celle des liquides; cependant toutes les expériences s'accordent à montrer qu'elle est aussi très-faible, et que la chaleur ne passe que très-lentement de molécule à molécule dans les couches qui sont en repos.

Cette propriété est mise à profit dans les arts : pour conserver la chaleur dans une enceinte, ou pour l'empêcher d'y pénétrer, il suffit de faire deux enveloppes entre lesquelles on enferme hermétiquement une couche d'air d'un ou deux pouces d'épaisseur, dont on gêne les mouvemens par quelques brins de paille, ou par quelque autre substance filamenteuse.

---

## CHAPITRE II.

### *Du Calorique rayonnant.*

246. *De l'existence du calorique rayonnant, et de l'idée qu'on peut se former des rayons calorifiques.* — Le calorique rayonnant est celui qui passe à travers certains corps, comme la lumière passe à travers les corps diaphanes. La chaleur solaire ne vient frapper la terre qu'après avoir traversé toute la couche atmosphérique ; et si l'air s'échauffe pendant un jour serein, tout le monde sait que les corps s'échauffent aussi, et qu'en général leur température est beaucoup plus haute que celle de l'air. Donc une partie de la chaleur du soleil traverse, comme la lumière, toute l'épaisseur de l'atmosphère sans être absorbée. De même, le feu d'un foyer nous échauffe à distance, sans que les couches d'air qui nous séparent de lui soient échauffées de proche en proche ; car on s'aperçoit aisément qu'elles restent froides et même qu'elles peuvent être agitées et rapidement renouvelées sans qu'à la même distance on en ressente un moindre effet. Un boulet rouge de feu, suspendu au milieu d'un appartement, est encore plus propre à montrer ce phénomène : de toutes parts autour de lui on reçoit une impression de chaleur, tandis que l'air environnant qui ne le touche pas conserve à peu près son état de repos et sa température primitive. Ainsi, les corps qui sont échauffés jusqu'à donner de la lumière ont en même temps la propriété d'*émettre* autour d'eux, dans tous les sens, du calorique qui passe à travers l'air, comme la lumière passe à travers les milieux diaphanes. C'est d'après

cette analogie que l'on dit, en parlant de la chaleur, *des rayons calorifiques*, *des rayons de calorique* ou *des rayons de chaleur*, comme on dit, *des rayons lumineux* ou *des rayons de lumière*. Si, d'un point de la surface d'un corps chaud, on mène à l'extérieur une ligne mathématique dans une direction quelconque, la chaleur qui se propage suivant cette ligne est ce qu'on appelle un *rayon de calorique*. Ainsi, la flamme et les corps échauffés jusqu'à devenir lumineux lancent de toutes parts des rayons de chaleur, comme ils lancent des rayons de lumière.

On ne voit pas d'abord combien est remarquable cette propriété, parce qu'elle porte avec elle une sorte d'explication, toute naturelle en apparence, et qui ne manque pas de se présenter à l'esprit. C'est la lumière elle-même, peut-on dire, c'est la lumière de la flamme et des corps rouges qui se propage à distance et qui échauffe les corps qu'elle rencontre; il n'est donc pas étonnant que cette chaleur rayonnante se comporte comme la lumière. Mais l'on découvre bientôt l'insuffisance de cette explication; car la *chaleur obscure* est rayonnante comme la *chaleur lumineuse*. Quand le boulet de l'expérience précédente tombe par le refroidissement, du rouge blanc au rouge cerise, puis au rouge, et ensuite au rouge obscur, il ne cesse pas pour cela de donner à distance l'impression de la chaleur; enfin, quand il cesse d'être visible, même dans les ténèbres, il ne cesse pas pour cela de lancer des rayons de chaleur, de toutes parts et à de grandes distances; à défaut d'un thermomètre, on peut s'en assurer avec la main. Ces rayons, il est vrai, sont moins vifs que ceux qui viennent du même corps, tout étincelant de lumière; mais, comme eux, ils traversent l'air librement et s'en vont frapper au loin et échauffer tous les corps environnans. Le même phénomène se reproduit sans cesse autour de tous les corps, quelle que soit leur température : un vase rempli d'eau bouillante rayonne comme un boulet rouge; le corps humain, qui n'est qu'à 37°, rayonne de la

même manière; la glace elle-même et les corps plus froids que la glace jouissent aussi de cette propriété fondamentale. Ainsi, tout corps, quel qu'il soit, est, par rapport à la chaleur, ce qu'est une bougie enflammée, par rapport à la lumière: de tous les points de la flamme partent des rayons lumineux qui se répandent au loin dans l'espace; pareillement, de tous les points d'un corps quelconque partent des rayons de chaleur qui traversent l'air et se propagent librement, jusqu'à ce qu'ils rencontrent quelques corps qui les arrêtent.

Pour étudier le calorique rayonnant, on se sert avec avantage d'un thermomètre particulier, que l'on appelle *thermoscope* ou *thermomètre différentiel*.

247. *Themomètre différentiel* — Cet appareil est représenté dans la *figure* 209. Pour le construire, on prend un tube dont le diamètre intérieur est de deux ou trois millimètres, on souffle une boule à l'une de ses extrémités, et on le courbe à angle droit vers le quart de sa longueur, en arrondissant la courbure; ensuite on y fait passer de l'acide sulfurique, coloré en rouge avec du carmin, de manière que la boule soit à peu près au quart pleine. On prépare un second tube pareil au premier et on le prépare tout-à-fait de la même manière, à cela près qu'on n'y met point de liquide; enfin on les soude bout à bout par leur extrémité ouverte, de telle sorte que leur ensemble forme les trois côtés d'un rectangle, comme on le voit dans la figure. Cela fait et l'équilibre de température étant établi, il est évident que l'extrémité de la colonne liquide reste au même point dans le tube, quelle que soit la température commune des deux boules; ce point est le o de l'échelle. Mais si l'une des boules est plus chaude que l'autre, l'excès de pression de l'air qu'elle contient met la colonne liquide en mouvement et la force à marcher vers la boule la plus froide. C'est donc la différence de température seulement qui devient sensible sur cet instrument, et c'est pour cela qu'on l'appelle

thermomètre différentiel. Pour le graduer, on enveloppe une des boules avec de la neige fondante, tandis qu'on maintient l'autre à une température connue, à 20° par exemple, et l'on divise en vingt parties égales l'espace qui a été parcouru par la colonne depuis le o jusqu'au point où elle s'arrête. Les divisions peuvent être continuées des deux côtés. Cet ingénieux appareil est dû à M. Leslie, l'un des premiers et des plus habiles expérimentateurs qui aient étudié les propriétés du calorique rayonnant. Pendant que M. Leslie, en Écosse, jetait les fondemens de cette nouvelle théorie de la chaleur, Rumford, en France, se livrait à des recherches sur le même sujet et avec le même succès. Rumford avait aussi inventé, pour ses expériences, un instrument analogue au thermomètre différentiel : c'est le thermoscope qui est représenté dans la *figure* 210. Ici la colonne liquide *i*, qui sert d'index, est très-courte; et, pour régler l'instrument, de manière qu'au zéro elle en occupe le milieu, il y a un petit appendice *a*, où elle peut se loger pendant que l'équilibre de température s'établit entre les deux boules. Ensuite on la fait sortir après avoir produit avec la chaleur de la main un excès de température dans la boule *b*, qui réponde à peu près à la longueur *ai*.

248. *Pouvoir absorbant.* — Le pouvoir absorbant est la faculté qu'ont les corps de s'approprier une partie plus ou moins grande de la chaleur rayonnante qui vient tomber sur leur surface. Tous les corps ont un pouvoir absorbant, par rapport à la chaleur solaire, car tous s'échauffent aux rayons du soleil; et ils ont des pouvoirs absorbans différens, car ils s'échauffent inégalement. Ces mêmes propriétés se reproduisent par rapport à la chaleur rayonnante obscure. Un vase un peu grand, étant rempli d'eau bouillante, si on lui présente, à quelque distance, le thermomètre différentiel, de manière que l'une des boules reçoive le rayonnement, tandis que l'autre en reste abritée par un écran, on observe dans la première un excès de température très-sen-

sible, qui est une preuve de l'absorption. Cet excès de température se manifeste, quel que soit l'état de la boule exposée au rayonnement, soit qu'elle ait sa surface vitrée naturelle, soit qu'on la revête d'une feuille d'or battu, ou d'une feuille de papier ou d'une couche de noir de fumée ou d'une autre substance quelconque. Donc toute substance a la propriété d'absorber au moins en partie le calorique rayonnant qui la frappe.

La nature des corps et l'état de leur surface ont une grande influence sur le pouvoir absorbant; car les deux boules du thermomètre différentiel étant exposées de la même manière au rayonnement, l'une ayant sa surface nue, l'autre ayant sa surface noircie ou couverte de diverses enveloppes très-minces, on observe entre elles des différences de température plus ou moins marquées, suivant la nature des enveloppes qui revêtent la seconde boule. En général, les surfaces métalliques, d'or, d'argent ou d'étain, ont un pouvoir absorbant très-faible et beaucoup moindre que celui de la surface nue, tandis que la surface noircie a un pouvoir absorbant plus grand.

249. *Pouvoir réfléchissant.* — Le pouvoir réfléchissant est la faculté qu'ont les corps de renvoyer, dans des directions déterminées, une partie plus ou moins grande des rayons de chaleur qui viennent tomber sur leur surface. Une expérience frappante met en évidence cette faculté des corps. On dispose deux miroirs paraboliques M et M′ en face l'un de l'autre et à la distance de quinze ou vingt pieds (*Fig.* 213); au *foyer* du premier on met de l'amadou, de la poudre ou quelque autre substance inflammable; au foyer du second on met un boulet chauffé au rouge blanc ou des charbons allumés dont on active le feu par un courant d'air rapide. Alors, en peu d'instans, on voit l'amadou qui s'échauffe et s'enflamme. Ce n'est point la chaleur directe qui peut produire ce phénomène curieux; car à quelques pouces du boulet ou à quelques pouces du feu,

l'amadou ne s'enflammerait pas. Mais les rayons calorifiques, émanés du corps chaud, par le côté qui regarde le miroir M′, tombent sur ce miroir, se réfléchissent parallèlement à l'axe commun xx, traversent l'air sans s'arrêter et viennent tomber sur le second miroir M, où ils se réfléchissent de nouveau, en se dirigeant pour concourir tous et pour se concentrer au même point *f*, qui en est le foyer.

Cette expérience ne prouve pas seulement que la chaleur se réfléchit, mais elle prouve encore que la chaleur se réfléchit comme la lumière : car, une bougie étant placée en *f′*, on observerait en *f* une image nette et brillante de la flamme; c'est même par ce moyen qu'on ajuste les miroirs et qu'on détermine les positions précises des foyers *f* et *f′*. La loi remarquable de cette réflexibilité est que l'angle de réflexion est toujours égal à l'angle d'incidence. L'*angle d'incidence* est celui que le rayon incident fait avec la normale, au point d'incidence, et l'*angle de réflexion*, celui que le rayon réfléchi fait avec cette même normale, en se relevant de l'autre côté et dans le même plan.

Puisque la chaleur obscure se propage par rayonnement, comme la chaleur lumineuse, il est probable aussi qu'elle se reflèchit comme elle. En effet, si, au boulet rouge de l'expérience précédente, on substitue un corps simplement chauffé à la température de l'eau bouillante ou même à une température encore moindre, et si, en même temps, à la place de l'amadou, on met, au foyer de l'autre miroir, une des boules du thermomètre différentiel, on voit cette *boule focale* s'échauffer sensiblement. C'est bien par les rayons réfléchis qu'elle s'échauffe; car l'autre boule est, comme elle, exposée aux rayons directs et ne s'échauffe pas. La même expérience peut se faire avec un seul miroir, comme on le voit *figure* 214; *c* est un cube rempli d'eau chaude, *t* un thermomètre qui en indique les températures.

Le pouvoir réfléchissant varie comme le pouvoir absorbant, suivant la nature du corps et suivant l'état de sa sur-

face. Si les miroirs n'avaient pas le vif éclat du métal, s'ils étaient mal polis, s'ils étaient enfumés à la flamme d'une lampe ou seulement ternis, il ne seraient plus capables d'allumer l'amadou, ni de produire les autres effets que nous venons d'observer. On voit même que ces deux pouvoirs ont entre eux une liaison nécessaire : les rayons qui ne sont pas réfléchis, en tombant sur un corps, sont certainement absorbés par sa surface, à moins que le corps ne soit transparent pour la chaleur; c'est pourquoi nous dirons en général que *le pouvoir absorbant est en raison inverse du pouvoir réfléchissant*, ou bien encore que le pouvoir absorbant est *complément* du pouvoir réfléchissant.

250. *Pouvoir rayonnant.* — Le pouvoir rayonnant, qu'on appelle aussi pouvoir émissif, est la faculté qu'ont les corps de rayonner ou d'émettre de la chaleur dans tous les sens, comme les corps lumineux rayonnent ou émettent de la lumière. Après avoir montré l'existence de cette faculté, en montrant l'existence de la chaleur rayonnante, nous allons rechercher les causes qui font varier le pouvoir rayonnant d'un même corps et comparer entre eux les pouvoirs rayonnans des corps différens.

Le pouvoir rayonnant d'un corps ne dépend que de l'état de sa surface : il est d'autant moindre que la surface est plus nette et plus polie, et au contraire d'autant plus grand qu'elle présente plus de stries et d'aspérités. Pour le démontrer on prend un cube creux dont les quatre faces latérales sont de même substance et de même épaisseur : l'une d'elles a le plus haut degré de poli et de netteté, les autres sont diversement dépolies, striées et sillonnées dans des sens différens. Ce cube étant mis en présence d'un réflecteur (*Fig.* 214), à la distance de trois ou quatre pieds, on ajuste son centre pour qu'il se trouve sur l'axe, et avec une bougie on détermine le foyer $f$, où doit se placer la boule focale du thermomètre différentiel. Après cette disposition, le cube étant rempli d'eau chaude, ses quatre faces latérales auront

la même température, et l'on pourra successivement, sans rien déranger, les tourner en présence du réflecteur. Or, on observe, dans cette expérience, des résultats fort différens pour les différentes faces. Par exemple, la face polie produisant dans la boule focale une élévation de température de 1°, la face la plus dépolie et la plus striée pourra produire une élévation deux ou trois fois plus grande, et les autres faces des résultats intermédiaires. Donc, la même substance, à la même température, peut avoir, suivant l'état de sa surface, des pouvoirs rayonnans très-différens, et, par conséquent, perdre par le rayonnement des quantités de chaleur très-différentes dans le même temps.

Sans trop s'écarter de la vérité, on peut supposer d'une part que les quantités de chaleur que reçoit la boule focale, sont proportionnelles aux excès de température qu'elle peut prendre; on peut supposer, d'une autre part, que les quantités de chaleur qu'elle reçoit sont proportionnelles aux quantités de chaleur rayonnante émise par les faces du cube, et, par conséquent, proportionnelles aux pouvoirs rayonnans de ces faces. Donc, *les pouvoirs rayonnans sont entre eux comme les excès de température de la boule focale*. Ainsi, la face polie donnant à cette boule un excès de température de 1° et la face la plus dépolie un excès de 3°, le pouvoir rayonnant de celle-ci est trois fois aussi grand que le pouvoir rayonnant de la première.

Pour comparer les pouvoirs rayonnans des différens corps, on peut se servir d'un cube pareil au précédent, ayant des faces latérales très-minces et successivement recouvertes de substances différentes : de verre, de papier blanc, ou de diverses couleurs, de noir de fumée, etc. Toutes ces substances doivent former elles-mêmes des couches peu épaisses, afin que leurs surfaces soient exactement maintenues à la température de l'eau intérieure. En représentant par 100 le pouvoir rayonnant du noir de fumée, qui est le plus grand que l'on observe, les pouvoirs

rayonnans des autres substances seront proportionnellement représentés par des nombres plus petits, comme on le voit dans le tableau suivant :

| | |
|---|---|
| Noir de fumée. . . . . . . . . . | 100 |
| Eau. . . . . . . . . . . . . . . . . | 100 |
| Papier à écrire. . . . . . . . . | 98 |
| Crown-glass.. . . . . . . . . . . | 90 |
| Encre de Chine. . . . . . . . . | 88 |
| Eau glacée. . . . . . . . . . . . | 85 |
| Mercure. . . . . . . . . . . . . | 20 |
| Plomb brillant. . . . . . . . . | 19 |
| Fer poli . . . . . . . . . . . . | 15 |
| Etain, argent, cuivre, or. . . | 12 |

Lorsqu'une surface métallique polie est légèrement humectée de quelque liquide, d'eau, d'huile, etc., son pouvoir émissif est à l'instant augmenté dans une grande proportion ; une couche extrêmement mince de vernis produit un effet analogue; et, ce qui est fort remarquable, une seconde couche ajoute encore à cet effet, une troisième pareillement, et ainsi de suite jusqu'à une certaine limite d'épaisseur. Il en résulte que les rayons de chaleur ne partent pas seulement de la surface mathématique des corps; mais qu'ils partent aussi des couches inférieures, jusqu'à une profondeur sensible au dessous de cette surface. Ce qui arrive aux rayons émergens qui sont lancés au dehors doit arriver aussi aux rayons incidens qui viennent frapper les corps pour pénétrer dans leur intérieur; et, en effet, un miroir verni réfléchit un peu moins qu'un miroir nu et poli ; et il réfléchit d'autant moins que la couche de vernis est plus épaisse. Donc, la réflexion se fait à une certaine profondeur au dessous de la surface mathématique de la dernière couche de vernis; car si elle avait lieu sur cette surface, elle resterait la même, quelle que fût l'épaisseur de la couche.

251. *De l'équilibre mobile de la chaleur dans une en-*

*ceinte dont les parois ont une température uniforme.* — Concevons une enceinte fermée de toutes parts (*Fig.* 207); supposons, pour plus de simplicité, qu'elle ait la forme sphérique, qu'elle soit vide, et que tous ses points aient au même degré le pouvoir de réfléchir, de rayonner et d'absorber la chaleur. La surface extérieure de cette enceinte étant maintenue d'une manière quelconque à une température invariable et uniforme pour tous les points, la surface intérieure aura la même température avec la même invariabilité et la même uniformité. L'équilibre aura lieu dans toute l'étendue de l'enceinte, quelle que soit sa grandeur, qu'elle ait un pied de diamètre ou qu'elle ait un million de lieues. Cela posé on peut concevoir l'équilibre de deux manières : premièrement on peut imaginer que la surface intérieure ait perdu sa faculté rayonnante, que chacun de ses points n'émette rien dans l'espace vide, et ne reçoive rien, que tout reste enfin dans le même état, et que le calorique soit immobile; secondement, on peut admettre que, malgré l'équilibre, la surface intérieure conserve encore sa faculté rayonnante, que chacun de ses points émette dans tous les sens des rayons dans le vide, et qu'il en reçoive aussi dans tous les sens, que tout change enfin à chaque instant et que le calorique soit sans cesse en mouvement, et la température sans cesse en équilibre. Ce second principe, énoncé pour la première fois par M. Prevost, de Genève, est ce qu'on appelle le principe de *l'équilibre mobile de la chaleur*. Certainement, si les parois de l'enceinte étaient lumineuses au lieu d'être chaudes, il est évident que la lumière remplirait toute l'étendue qu'elles embrassent, que les rayons se renouvelleraient à chaque instant, et que dans toutes les directions chaque point en recevrait sans cesse autant qu'il en envoie. La clarté serait toujours la même, ou, si l'on veut, toujours en équilibre, et la lumière toujours en mouvement. Les analogies frappantes qui existent entre la lumière et le calorique rayonnant ne laissent

aucun doute sur la vérité du principe de l'équilibre mobile de la chaleur. Cependant ces notions fondamentales sur le calorique rayonnant restaient vagues, et les nombreuses expériences auxquelles elles conduisaient restaient sans liaison, lorsque M. Fourier, en les soumettant à l'analyse mathématique, se plaça au premier rang parmi les géomètres et parmi les physiciens, car il eut la double gloire de reculer les bornes de l'analyse et de fonder en même temps une nouvelle théorie de la chaleur. C'est dans ses ouvrages, et dans ceux de M. de Laplace et de M. Poisson sur le même sujet, que l'on peut suivre dans tous ses développemens cette branche féconde de physique mathématique, dont les géomètres du siècle dernier n'avaient pas même soupçonné l'existence.

Nous devons nous borner ici à indiquer quelques-uns des résultats les plus simples. Dans une enceinte vide, dont les parois sont maintenues à une température constante et uniforme pour tous les points, un thermomètre placé en un lieu quelconque se réchauffe ou se refroidit jusqu'à ce qu'il arrive enfin à la température de l'enceinte elle-même. C'est alors seulement que l'équilibre est établi et que le thermomètre reste immobile.

Ce résultat est indépendant de la forme et de la grandeur de l'enceinte; il est indépendant de l'état de sa surface, c'est-à-dire des pouvoirs réfléchissant, absorbant et rayonnant de ses différens points; il est indépendant de sa température: qu'elle soit à 100° au dessous de 0, ou à 1000° au dessus, tout se passe de même; enfin, il est indépendant de la surface plus ou moins réfléchissante ou absorbante du thermomètre. Ainsi, quand l'équilibre est établi, le thermomètre s'approprie par l'absorption autant de chaleur qu'il en perd par l'émission; c'est ce qu'on exprime en disant que dans l'état d'équilibre le pouvoir absorbant d'un corps est toujours égal à son pouvoir rayonnant; mais quand le corps se réchauffe, il reçoit plus qu'il ne perd, et au con-

traire quand il se refroidit il perd plus qu'il ne gagne. Dans tous les cas il y a échange et compensation plus ou moins complète; c'est ainsi que se résout la question du chaud et du froid, c'est-à-dire la question de savoir s'il y a des rayons frigorifiques comme il y a des rayons calorifiques. On voit, en effet, que les rayons frigorifiques n'existent pas; dans une enceinte qui serait à 100° au dessous de 0, un corps recevrait de la chaleur des différens points de l'enceinte, car il se refroidirait moins vite que dans une enceinte à 200° au dessous de 0, et moins vite à plus forte raison que dans un espace infini où il n'y aurait ni chaleur ni température.

252. *Réflexion du froid.* — Au foyer de l'un des miroirs (*Fig.* 215) on met au lieu d'amadou, un thermomètre différentiel ou même un thermomètre ordinaire; au foyer de l'autre miroir, au lieu du boulet rouge, on met un morceau de glace ou un matras rempli d'un mélange réfrigérant, et à l'instant on observe un abaissement de température : si l'on a employé le thermomètre différentiel, la boule focale tombe à plusieurs degrés au dessous de l'autre boule, et si c'est un thermomètre ordinaire, il tombe pareillement à plusieurs degrés au dessous de la température ambiante. Telle est l'expérience curieuse de la réflexion du froid; c'est M. Pictet, de Genève, qui la fit pour la première fois. Quelques physiciens ont voulu en conclure l'existence des rayons frigorifiques : il faut bien, disent-ils, que ces rayons existent et qu'ils soient distincts des rayons de chaleur, puisqu'en les accumulant sur le thermomètre au foyer d'un miroir, le thermomètre descend d'autant plus qu'on en accumule davantage; mais ce raisonnement tombe quand on considère le phénomène d'une manière complète : un thermomètre est toujours dans une enceinte; suspendu dans un appartemement, ce sont les murs et les objets divers qui forment les parois de l'enceinte avec laquelle il échange sa chaleur; exposé à l'air libre, c'est la surface de la terre,

les nuages et le ciel qui forment une autre enceinte plus vaste et plus irrégulière, mais dont tous les points rayonnent de la chaleur sur le thermomètre et en reçoivent pareillement.

Ainsi, dans l'expérience précédente, les rayons de chaleur émanés du corps froid, en couvrant toute la surface du second miroir et en se réfléchissant vers le foyer où se trouve le thermomètre, produisent à peu près le même effet que s'ils étaient envoyés par le miroir lui-même. C'est donc comme si on présentait au thermomètre un corps froid, large comme le miroir. Or il est visible (*Fig.* 208) que, si le segment *ss* d'une enceinte devenait plus froid que le reste des parois, le thermomètre *c* éprouverait un abaissement de température et un abaissement d'autant plus grand que le segment froid aurait lui-même plus d'étendue. Au lieu de refroidir les parois elles-mêmes, si on place un corps froid entre elles et le thermomètre, le même effet est produit, le thermomètre ne perd pas plus de chaleur qu'il n'en perdait, mais il en reçoit moins, parce que le corps interposé est moins chaud que la surface de l'enceinte qu'il cache au thermomètre, et dont il intercepte les rayons.

253. *De la transmission du calorique rayonnant.* — Ce n'est pas seulement à travers l'air que passe librement le calorique rayonnant, mais il passe encore de la même manière à travers l'eau, le verre et la plupart des corps diaphanes. Un écran de verre placé entre le corps chaud et le réflecteur ne diminue pas beaucoup l'élévation de température qu'éprouvait la boule focale, et le verre lui-même ne s'échauffe que très-peu; il en est de même d'une feuille mince de mica ou de chaux sulfatée. Cependant la lumière elle-même éprouvant quelque absorption dans les corps les plus transparens, on peut conclure par analogie, et vérifier aussi par expérience, que la chaleur rayonnante est en partie absorbée, quel que soit le milieu qu'elle traverse. Voici sur ce sujet deux résultats importans qui se dédui-

sent des belles et nombreuses expériences de Delaroche.

Premièrement, la chaleur rayonnante qui émane des corps les plus chauds, traverse plus facilement les milieux diaphanes et s'y trouve absorbée en moindre proportion : par exemple, un écran de verre arrêtant les $\frac{17}{18}$ de la chaleur émise par un corps à 180°, n'arrête que les $\frac{6}{7}$ de la chaleur émise par un corps à 400°, et la moitié seulement de la chaleur émise par la flamme d'une lampe.

Secondement, la chaleur rayonnante qui a traversé une première lame de verre est absorbée en moindre proportion lorsqu'elle en traverse une seconde et une troisième. Il est probable que cette propriété singulière s'étend à tous les corps transparens, et qu'elle se manifeste aussi dans les milieux continus. D'après cela, les rayons de chaleur qui auraient traversé une couche d'air d'une certaine épaisseur, n'éprouveraient qu'une moindre absorption en traversant les couches suivantes, et pourraient ainsi se propager à des distances beaucoup plus grandes sans être complètement éteints.

---

## CHAPITRE III.

### *Des Lois du Refroidissement.*

254. Depuis Newton, qui, le premier, a posé quelques principes sur le refroidissement des corps, les plus habiles physiciens ont fait des expériences et des recherches mathématiques sur ce sujet. Cependant la question restait enveloppée de difficultés insurmontables, et l'on n'avait fait que quelques pas incertains vers sa solution quand MM. Dulong et Petit sont parvenus à la résoudre d'une manière complète. Leur travail, qui fut couronné par l'Académie des Sciences en 1818, est un modèle d'exactitude et d'invention, que les jeunes physiciens ne peuvent étudier avec trop de soin. Nous ne pouvons ici en donner qu'un extrait fort abrégé.

255. *Loi du refroidissement dans le vide.* — Un corps isolé au milieu d'une enceinte vide ne peut se réchauffer ou se refroidir que par l'échange de chaleur rayonnante qui se fait entre sa surface et celle de l'enceinte. Si ce corps est solide, sa nature, l'état de sa surface, sa grandeur, sa forme et la conducibilité de sa substance auront une influence sur les résultats; s'il est liquide, le mélange qui se fait par les courans maintient toute la masse à la même température, l'influence de la conducibilité disparaît, et il n'y a plus à considérer que la nature du liquide, la surface du vase, sa grandeur et sa forme. Mais pour distinguer ce qui appartient à chacun de ces élémens, il faut savoir ce qu'on appelle *vitesse de refroidissement* et *loi de refroidissement*.

Lorsqu'un corps est plus chaud que les parois de l'enceinte dans laquelle il est placé, sa température diminue à mesure que le temps s'écoule, et sa vitesse de refroidissement pour un instant donné et le rapport qui existe entre l'abaissement de la température et la durée de cet instant.

Ainsi, lorsqu'un corps est beaucoup plus chaud que l'enceinte, et que son abaissement de température est, par exemple, de 10 en 1'', sa vitesse de refroidissement est double de ce qu'elle sera, quand, après s'être refroidi de plus en plus, il arrivera à ne perdre que 5° en 1''. Depuis le premier jusqu'au dernier instant du refroidissement, la vitesse est donc changeante et toujours décroissante, et l'on appelle loi de refroidissement la liaison qui existe entre toutes ces vitesses successives. Il en résulte que, pour deux corps donnés, les vitesses de refroidissement peuvent être fort différentes, tandis que la loi de refroidissement est la même; car il suffit pour cela que les vitesses correspondantes aux mêmes instans aient entre elles les mêmes rapports. MM. Dulong et Petit se sont d'abord assurés, par de nombreuses expériences, que la loi de refroidissement des liquides est toujours la même, et qu'elle ne dépend ni de la nature ni du volume du liquide, ni de la forme ni de la surface du vase, ni de la grandeur ni du pouvoir rayonnant de l'enceinte. Cette loi générale de refroidissement repose sur les principes suivans.

1°. Lorsqu'un corps est en équilibre de température dans une enceinte sans pouvoir réfléchissant, dont la température est constante, la vitesse de son refroidissement est égale à la vitesse de réchauffement que l'enciente tend à lui imprimer.

2°. La vitesse *absolue* de refroidissement d'un corps (c'est-à-dire celle qu'il aurait s'il ne recevait aucun rayon pour compenser ses pertes) augmente en progression géométrique lorsque la température de ce corps augmente en progression arithmétique.

Ainsi $m$ étant la vitesse de son refroidissement à la température o, $m\ a^{t+\theta}$ sera la vitesse pour la température $t+\theta$. La *raison a* de cette progression est la même pour tous les corps quelle que soit leur nature. D'après cela, quand un corps dont la température est $t+\theta$ se trouve dans une enceinte dont la température est $\theta$, sa vitesse *réelle* de refroidissement n'est autre chose que sa vitesse *absolue*, diminuée de la vitesse de *réchauffement* due au calorique qu'il reçoit de l'enceinte. Cette vitesse de réchauffement est facile à trouver : en effet, l'enceinte étant à o, désignons par $k$ sa vitesse absolue de refroidissement, c'est-à-dire celle qui se produirait si le calorique, au lieu de sortir d'un point de sa paroi pour aller tomber sur un autre, était détruit à l'instant même où il sort. Toute cette chaleur, que nous supposons ainsi anéantie, n'est pas absorbée par le corps; en réalité, il n'en arrête qu'une partie, qui lui donne un réchauffement dont la vitesse est $m$; car cette même quantité $m$, qui représente sa vitesse absolue de refroidissement quand il est à o, doit représenter aussi la vitesse de réchauffement qu'il éprouve de la part d'une enceinte qui est à o comme lui, et dans laquelle il est en équilibre. A la température $\theta$, l'enceinte au lieu d'avoir une vitesse absolue de refroidissement égale à $k$, aura, par le second principe, une vitesse représentée par $k\ a^{\theta}$; et pareillement, au lieu de donner au corps une vitesse de réchauffement égale à $m$, elle lui donnera une vitesse de réchauffement égale à $m\ a^{\theta}$; c'est donc là ce qu'il faut retrancher de $m\ a^{t+\theta}$ pour avoir la vitesse réelle de refroidissement du corps; et l'on a enfin, en représentant par v la vitesse de refroidissement,

$$v = m a^{t+\theta} - m\ a^{\theta},$$

où

$$v = m a^{\theta}\ (a^{t} - 1).$$

Telle est la loi remarquable du refroidissement dans une enceinte vide et qui ne réfléchit pas.

La valeur de $a$, qui est la même pour tous les corps, a été trouvée par expérience égale à 1,0077.

La valeur de $m$ est variable pour les différens corps, et de plus elle est variable pour le même corps, suivant la masse et la forme qu'on lui donne, et suivant l'état de sa surface.

Ces expériences fournissent un moyen rigoureux de comparer les pouvoirs rayonnans des corps à des températures très-élevées; et l'on trouve que le rapport de ces pouvoirs ne varie pas avec la température. Ainsi le rapport du pouvoir rayonnant du verre à celui de l'argent mat est 5,707 aux températures voisines de 300° comme aux températures voisines de 100°.

On peut voir aisément que, si l'enceinte avait un pouvoir réfléchissant, la loi de refroidissement serait la même, si ce n'est que $m$ ne serait plus la vitesse absolue du refroidissement du corps à la température 0.

256. *Loi du refroidissement dans les gaz.* — Un corps qui se refroidit dans une enceinte remplie de gaz, se refroidit par deux causes; 1° par le rayonnement; 2° par le contact du gaz. Or, un premier résultat très-remarquable, c'est que la présence du gaz ne modifie en aucune manière les échanges de chaleur qui se font par rayonnement; d'où il résulte que, le refroidissement total qu'éprouve un corps plongé dans un gaz étant connu, il suffit d'en retrancher le refroidissement que ce corps éprouve dans le vide, pour avoir la partie du refroidissement qui est due au contact seul du gaz.

Les fluides élastiques qui ont été soumis à l'expérience sont : l'air, le gaz hydrogène, l'acide carbonique et le gaz oléifiant; voici les lois générales de leurs pouvoirs refroidissans.

1°. Les pertes de chaleurs dues au contact du gaz sont, toutes choses égales d'ailleurs, indépendantes de l'état de la surface du corps qui se refroidit.

2°. Les pertes de chaleur dues au contact d'un gaz crois-

sent avec les excès de température, suivant une loi qui reste la même, quelle que soit l'élasticité du gaz.

3°. Pour une même différence de température, le pouvoir refroidissant d'un même gaz varie en progression géométrique, lorsque sa force élastique varie elle-même en progression géométrique; et, si l'on suppose le rapport de cette seconde progression égal à 2, le rapport de la première sera 1,366 pour l'air, 1,301 pour l'hydrogène, 1,431 pour l'acide carbonique, et 1,415 pour le gaz oléifiant.

257. Les propriétés du calorique rayonnant et les lois du refroidissement dans le vide et dans les gaz trouvent leurs applications dans une foule de phénomènes naturels. Nous verrons dans les *Elémens de Météorologie* que c'est en partant de ces principes que l'on peut expliquer la gelée, le givre et la rosée; que l'on peut rendre raison des températures de la terre aux diverses latitudes, de la température des eaux et des différentes régions de l'air, et que l'on peut enfin mesurer avec exactitude la quantité totale de chaleur que, dans une année, le soleil verse sur la terre.

FIN DE LA TROISIÈME PARTIE.

# QUATRIÈME PARTIE.

## *De la mesure de la Chaleur, et des causes qui la produisent.*

## CHAPITRE PREMIER.

### *Du Calorique spécifique.*

258. *Des quantités de chaleur et des moyens de les comparer.* — Nous admettons comme un principe évident de lui-même que, pour produire un même effet, il faut toujours une même quantité de chaleur. Par exemple, un kilogramme de fer étant à la température de 10°, s'il passe d'une manière quelconque à la température de 11°, nous admettons qu'il reçoit toujours la même quantité de chaleur, soit que cette chaleur lui vienne du soleil ou d'un foyer, soit qu'elle lui vienne du contact ou du rayonnement d'un corps quelconque. De même un kilogramme de glace à 0, prend toujours la même quantité de chaleur pour se fondre, quelles que soient les circonstances de la fusion; et un kilogramme d'eau à 100° prend toujours la même quantité de chaleur pour se vaporiser, soit que l'évaporation soit lente ou rapide. Pour que l'effet soit le même, il ne suffit pas toutefois qu'il se produise sur des masses égales de la même matière, mais il faut que cette matière,

identique par sa nature, soit identique aussi par l'arrangement de ses molécules. Ainsi, deux masses égales de fer, autrement travaillées, plus ou moins écrouies ou plus ou moins forgées, pourraient bien prendre des quantités de chaleur différentes pour passer de 10 à 11°; deux poids égaux de glace, pour entrer en fusion, pourraient bien prendre aussi des quantités de chaleur différentes, si l'un était, par exemple, de la glace compacte, et l'autre de la neige ou de la glace pilée; enfin, une même quantité d'eau peut bien prendre en se vaporisant des quantités de chaleur différentes, suivant qu'elle se vaporise à o, par exemple, ou à 100° de température.

D'après ce principe fondamental, nous pourrons comparer des quantités de chaleur données, toutes les fois que nous pourrons les appliquer successivement à produire un même effet, c'est-à-dire à élever la température d'un corps, ou à liquéfier un solide, ou à vaporiser un liquide. Mais comme il faut pour cela que le calorique sorte des corps où il se trouve, pour passer dans les corps où il doit produire un de ces effets, il en résulte que nous ne pouvons jamais comparer les quantités totales ou absolues de calorique que possèdent les corps; car nous ne pouvons jamais les épuiser de tout le calorique qu'ils contiennent. Nos mesures sont restreintes aux seules quantités de chaleur que nous pouvons faire sortir des corps.

On dit qu'une substance a plus ou moins de *capacité pour la chaleur*, suivant qu'elle exige plus ou moins de chaleur pour éprouver un changement de température donné, un changement de 1°, par exemple; et cette quantité de chaleur s'appelle elle-même la *chaleur spécifique* de la substance. Sa capacité sera *constante* lorsqu'à poids égal il faudra des quantités égales de chaleur pour élever sa température de 1° en un point quelconque de l'échelle thermométrique, c'est-à-dire pour la faire passer de o à 1°, de 1° à 2°, et de 100° à 101°, de 200° à 201, etc. Ainsi le

fer, par exemple, n'a pas une capacité *constante*, mais une capacité *variable* et *croissante*, parce qu'un kilogramme de fer exige une certaine quantité de chaleur pour passer de 0 à 1°, il en exige un peu plus pour passer de 100 à 101, plus encore pour passer de 200 à 201, etc. Le rapport de ses capacités pour deux points donnés de l'échelle, à 0, par exemple, et à 300°, est le rapport des quantités de chaleur qu'il exige en chacun de ces points pour éprouver des changemens égaux de température. En général, le rapport des capacités de deux substances n'est autre chose que le rapport de leurs chaleurs spécifiques, c'est-à-dire le rapport des quantités de chaleur qu'elles prennent à poids égal et au même degré, pour éprouver des changemens égaux de température. On a coutume de rapporter toutes les capacités à celle de l'eau prise pour unité; ainsi, quand on dit que la capacité d'une substance est 2, 3, 4, etc., cela signifie (à moins qu'on ne prévienne du contraire) que sa capacité est 2, 3 ou 4 fois celle de l'eau. On dirait de la même manière et dans le même sens que la chaleur spécifique d'un corps est 2, 3, 4, etc. D'après ces définitions, il sera facile de comprendre les méthodes et les instrumens que l'on emploie pour déterminer les capacités ou les chaleurs spécifiques de différens corps.

259. *Calorimètre de Lavoisier et de Laplace.* — Une coupe de cet instrument est représentée dans la *Figure* 204: il se compose de trois vases de tôle ou de fer-blanc c, $c_1$ et $c_2$, dont le plus grand c enveloppe le moyen $c_1$, et celui-ci à son tour enveloppe le plus petit. L'intervalle qui sépare le premier du second se remplit de glace dont l'eau de fusion s'écoule par le robinet R, et l'intervalle qui sépare de toutes parts le second du troisième est pareillement rempli de glace pilée dont l'eau de fusion s'écoule par le robinet *r*. Ainsi, le calorique extérieur est arrêté et absorbé par la première couche de glace, et ne peut jamais pénétrer jusqu'à la seconde couche pour y opérer une fusion; de

même le calorique intérieur, celui qui sort de la substance enfermée dans le petit vase, est entièrement absorbé par la seconde couche de glace, et employé à la fondre, sans pouvoir jamais passer dans la première couche, et, à plus forte raison, sans pouvoir jamais se perdre à l'extérieur. D'après cela, rien n'est plus facile à comprendre que l'usage de cet instrument pour résoudre les questions relatives à la capacité.

Pour savoir, par exemple, si la capacité du fer est constante, on chauffe un boulet à la température de 50°, on le met très-rapidement dans le vase, on ajuste les couvercles, et on recueille toute la quantité d'eau qui s'écoule par le robinet *r*, pendant que le boulet descend à la température 0; ensuite on refait la même expérience après avoir chauffé le boulet à 100, 150, 200, etc. Les quantités de chaleur abandonnées sont entre elles comme les quantités de glace fondues ou comme les quantités d'eau qui s'écoulent; et il est facile de voir qu'elles ne sont pas entre elles comme les nombres 1, 2, 3, 4, etc., mais dans une proportion plus rapide; ce qui prouve que la capacité du fer est croissante dans la même proportion.

Pour déterminer les capacités des différens corps, on les chauffe tous successivement à la même température, et on recueille les quantités d'eau qu'ils fournissent en retombant à la température 0. S'ils ont tous le même poids, leurs capacités sont comme les quantités d'eau qui s'écoulent; sinon il faut tenir compte du rapport des poids.

Pour les liquides, on détermine d'avance les capacités des flacons dans lesquels ils doivent être enfermés.

Au lieu du calorimètre, on peut employer un *puits de glace*, comme on le voit *figure* 205; cette méthode offre même de l'avantage, à cause de l'eau qui reste dans le calorimètre pour imbiber toute la couche de glace pilée qui enveloppe le corps.

260. *Méthode du refroidissement.* — Cette méthode,

inventée d'abord par Mayer, perfectionnée par M. Leslie, et employée aussi par M. Despretz, n'a véritablement acquis une précision suffisante qu'entre les mains de MM. Dulong et Petit; elle repose sur ce principe, que deux surfaces égales et également rayonnantes perdent dans le même temps une même quantité de chaleur lorsqu'elles sont à la même température. Supposons donc qu'un vase d'argent poli, ayant un petit volume et des parois très-minces, soit successivement rempli de différentes substances pulvérisées; en le laissant refroidir, à partir d'une même température, les quantités de chaleur perdues au premier instant du refroidissement seront toujours égales entre elles, et si, pour l'une des substances, la vitesse de refroidissement est double de ce qu'elle est pour l'autre, on en pourrait conclure que sa capacité est moitié, si son poids était le même, puisqu'en perdant une même chaleur elle se serait abaissée d'un nombre de degrés double. On conçoit qu'il y a des corrections à faire, parce qu'en général les différentes poudres contenues dans le vase d'argent ont des poids différens, et aussi parce qu'il faut tenir compte de la chaleur propre du vase d'argent lui-même.

MM. Dulong et Petit prennent un vase de petite dimension, afin que les masses soient petites; ils le prennent d'argent et à minces parois, afin que la conducibilité propre n'ait qu'une faible influence; enfin ils le prennent poli, et le font refroidir dans un air très-raréfié, avec un faible excès de température de 5° ou 10° au plus, afin que le refroidissement soit très-lent. Toutes ces précautions ont une grande influence sur les résultats.

261. *Méthode des mélanges.* — Dans cette méthode on emploie toujours deux corps : un corps chaud qui se refroidit et un corps froid qui se réchauffe, de telle façon, que toute la chaleur qui sort du premier soit employée à élever la température du second. Supposons, par exemple, que l'on jette un kilogramme de mercure à 100° dans un

kilogramme d'eau à 0° : le mercure se refroidit, et l'eau se réchauffe jusqu'à ce que le mélange ait acquis à la fin une température commune. Si cette température était de 50°, l'eau et le mercure auraient des capacités égales, puisque la même quantité de chaleur produirait dans ces deux substances, à masse égale, des changemens égaux de température, d'une part 50° d'abaissement, et de l'autre 50° d'élévation. Mais, en réalité, le mélange ne s'élève qu'à 3° environ; c'est-à-dire que le mercure perd 97°, tandis que l'eau en gagne 3 : donc la capacité du mercure est beaucoup moindre que celle de l'eau; on voit qu'elle en est les $\frac{3}{97}$ ou environ les 0,03. En général, pour des masses égales, les capacités sont en raison inverse des variations des températures.

Si les masses étaient différentes, on calculerait facilement le rapport des capacités. Soit $x$ la capacité de la substance froide, M sa masse et $t$ sa température primitive; soit $x'$ la capacité de la substance chaude, M′ sa masse, et $t'$ sa température ; soit $\theta$ la température du mélange.

La substance chaude perd un nombre de degrés $(t'-\theta)$, et par conséquent une quantité de chaleur $M'x'(t'-\theta)$. La substance froide gagne un nombre de degrés $(\theta-t)$, et par conséquent une quantité de chaleur $Mx(\theta-t)$ ; mais la quantité de chaleur perdue par la première est égale à la quantité de chaleur gagnée par la seconde. Donc

$$M'x'(t'-\theta)=Mx(\theta-t),$$

d'où

$$\frac{x'}{x}=\frac{M(\theta-t)}{M'(t'-\theta)}$$

Cette formule suppose que le vase dans lequel on fait le mélange ne participe pas aux variations de température, et qu'il n'y ait non plus aucune chaleur perdue pendant la durée de l'expérience; mais il est facile, dans chaque cas, de faire les corrections nécessaires.

Les substances susceptibles de se combiner sont enfermées dans des flacons dont on détermine d'avance le poids et la chaleur spécifique.

262. *Calorimètre de Rumford.* — Cet appareil est surtout destiné à recueillir les quantités de chaleur abandonnées par les substances gazeuses : il se compose d'une caisse de fer-blanc ou de cuivre mince (*Fig.* 216), de 22 centimètres de longueur, sur 12 centimètres de largeur et 12 de profondeur, que l'on remplit d'un poids déterminé d'eau distillée; un thermomètre en indique à chaque instant la température; un serpentin de métal très-mince, de forme rectangulaire, ayant 4 centimètres de largeur sur 18 millimètres d'épaisseur, s'ouvre au dessous de la caisse en forme *d'entonnoir*, et pénètre dans son intérieur où il fait diverses circonvolutions. Les produits gazeux entrent par l'entonnoir, parcourent le serpentin où ils se dépouillent de leur excès de chaleur et sortent enfin à la température de l'eau de la caisse. Pour que l'appareil conserve exactement toute la chaleur qu'il reçoit sans la dissiper au dehors, on détermine par des épreuves préalables la température à laquelle il doit s'élever au dessus du milieu ambiant; s'il doit s'élever par exemple de 5°, on s'arrange pour lui donner une température de 5° au dessous au moment où l'on commence l'expérience; alors pendant qu'il se réchauffe pour arriver à la température ambiante, il reçoit du calorique extérieur à peu près autant qu'il en perd lorsqu'il dépasse cette température pour arriver à 5° au dessus.

C'est avec un calorimètre de cette espèce que MM. de la Roche et Bérard ont déterminé les chaleurs spécifiques des gaz. On conçoit aisément quelle habileté il faut pour des recherches aussi délicates, combien il y a de précautions à prendre et de corrections à faire. . . . . . .

263. *Capacité des solides et des liquides.*

Les tableaux suivans contiennent les résultats qui ont été obtenus par les divers procédés.

I. *Tableau des capacités déterminées par MM. Lavoisier et de Laplace.*

| NOMS DES SUBSTANCES. | CAPACITÉS. |
|---|---|
| Eau. | 1,0000 |
| Plomb. | 0,0282 |
| Mercure. | 0,0290 |
| Etain. | 0,0475 |
| Oxide rouge de mercure. | 0,0501 |
| Fer battu. | 0,1105 |
| Verre sans plomb. | 0,1929 |
| Soufre. | 0,2085 |
| Chaux vive. | 0,2169 |
| Huile d'olive. | 0,3096 |
| Acide sulfurique, densité 1,87. | 0,3346 |
| Acide nitrique, densité 1,30. | 0,6614 |
| Solution de nitre (nitre 1, eau 8). | 0,8187 |

II. *Tableau des capacités déterminées par la méthode des mélanges, par MM. Dulong et Petit.*

| NOMS DES SUBSTANCES. | CAPACITÉS moyennes entre 0 et 100°. | CAPACITÉS. moyennes entre 0 et 300°. |
|---|---|---|
| Eau. | 1,0000 | » |
| Mercure. | 0,0330 | 0,0350 |
| Platine. | 0,0335 | 0,0355 |
| Antimoine. | 0,0507 | 0,0547 |
| Argent. | 0,0557 | 0,0611 |
| Zinc. | 0,0927 | 0,1015 |
| Cuivre. | 0,0940 | 0,1013 |
| Fer. | 0,1098 | 0,1218 |
| Verre. | 0,1770 | 0,1900 |

III. *Tableau des capacités déterminées par la méthode du refroidissement de MM. Dulong et Petit.*

| NOMS DES SUBSTANCES. | CAPACITÉS, celle de l'eau étant prise pour unité. | POIDS des atomes, l'atome d'oxigène pesant 1. | PRODUITS du poids de chaque atome par la capacité correspond. |
|---|---|---|---|
| Bismuth. . . . . . . . | 0,0288 | 13,30 | 0,3830 |
| Plomb. . . . . . . . . | 0,0293 | 12,95 | 0,3794 |
| Or. . . . . . . . . . . | 0,0298 | 12,43 | 0,3704 |
| Platine. . . . . . . . | 0,0314 | 11,16 | 0,3740 |
| Etain. . . . . . . . . | 0,0514 | 7,35 | 0,3779 |
| Argent. . . . . . . . | 0,0557 | 6,75 | 0,3759 |
| Tellure. . . . . . . . | 0,0912 | 4,03 | 0,3675 |
| Zinc. . . . . . . . . . | 0,0927 | 4,03 | 0,3736 |
| Cuivre. . . . . . . . . | 0,0949 | 3,957 | 0,3755 |
| Nickel. . . . . . . . . | 0,1055 | 3,69 | 0,3819 |
| Fer. . . . . . . . . . | 0,1100 | 3,392 | 0,3731 |
| Cobalt. . . . . . . . . | 0,1498 | 2,46 | 0,3685 |
| Soufre. . . . . . . . . | 0,1880 | 2,011 | 0,3780 |

Les résultats de MM. Dulong et Petit sont extrêmement remarquables.

Le 2e tableau fait voir que les capacités vont en croissant d'une manière sensible à mesure que la température s'élève ; il est probable que ce résultat est général.

Le 3e tableau indique une loi fondamentale de la théorie de la chaleur; il indique que la capacité d'un corps simple multipliée par le poids de son atome donne un produit constant ; car la 4e colonne, qui représente ces produits, ne contient que des nombres très-peu différens, dont la moyenne ne s'écarte pas sensiblement de 0,375 : ce qui signifie, en d'autres termes, que *les atomes des corps simples ont tous exactement les mêmes capacités pour la chaleur*. Ce résultat se vérifie d'une manière si frappante

pour toutes les substances élémentaires rapportées dans le tableau, qu'il est permis d'espérer qu'un jour il sera généralisé par l'expérience, et qu'il constituera une des découvertes les plus importantes que nous puissions faire sur la chaleur. Il paraît résulter aussi de quelques essais de MM. Dulong et Petit, sur les corps composés, qu'il existe toujours un rapport simple entre la capacité des atomes composés et celle des atomes élémentaires.

264. *Capacité des gaz.* Les gaz n'ayant en général qu'une petite masse sous un grand volume, leurs molécules tendant sans cesse à s'échapper, et les pressions qu'ils supportent étant sans cesse changeantes, on conçoit qu'il est difficile de déterminer avec précision leurs capacités pour la chaleur. Ne pouvant entrer ici dans le détail de ces expériences délicates et compliquées, nous nous contenterons de rapporter les résultats qui ont été obtenus par MM. de la Roche et Bérard.

*Tableau des chaleurs spécifiques des gaz, d'après MM. de la Roche et Bérard.*

| NOMS DES SUBSTANCES. | CAPACITÉS à volumes égaux, celle de l'air étant 1. | CAPACITÉS à masses égales, celle de l'air étant 1. | CAPACITÉS à masses égales, celle de l'eau étant 1. |
|---|---|---|---|
| Air atmosphérique. . | 1,0000 | 1,0000 | 0,2669 |
| Hydrogène. . . . . | 0,9033 | 12,3401 | 3,2936 |
| Oxigène. . . . . . . | 0,9765 | 0,8848 | 0,2361 |
| Azote. . . . . . . . . | 1,0000 | 1,0318 | 0,2734 |
| Oxide de carbone . . | 1,0340 | 1,0805 | 0,2884 |
| Acide carbonique . . | 1,2588 | 0,8280 | 0,2210 |
| Oxide d'azote. . . . | 1,5503 | 0,8878 | 0,2369 |
| Gaz oléifiant. . . . . | 1,5530 | 1,5763 | 0,4207 |
| Vapeur aqueuse. . . | 1,9600 | 3,1360 | 0,8470 |

Nous venons de voir que les capacités des solides et des liquides paraissent en général devenir croissantes à mesure que les températures s'élèvent; mais on admet au contraire que *sous la même pression la capacité d'une masse gazeuse est indépendante de la température*, c'est-à-dire, en d'autres termes, que, sous une pression constante, les dilatations qu'elle éprouve sont proportionnelles aux quantités de chaleur qu'elle reçoit. M. de Laplace admet en outre dans sa théorie des gaz (*Mécanique céleste*, liv. XII) un second principe fondamental: savoir, qu'il y a un rapport *invariable* entre *la capacité d'un gaz à pression constante* et *sa capacité à volume constant*. Sa capacité à pression constante est la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température de 1°, en lui permettant de se dilater sous la même pression; et sa capacité à volume constant est la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température de 1°, en le comprimant à mesure, pour que son volume ne change pas.

La première de ces capacités est évidemment plus grande que la seconde, puisque tous les gaz dégagent de la chaleur quand on les comprime; ainsi, ce rapport étant désigné par K, la valeur de K sera toujours plus grande que l'unité. On ne la connaît jusqu'à présent que pour l'air et la vapeur d'eau; pour l'air, on a, d'après les expériences de MM. Gay-Lussac et Welter, $K = 1,375$; pour la vapeur d'eau, M. Poisson trouve, d'après les expériences de MM. Clément et Desormes, que l'on aurait $K = 1,0{,}73$. En s'appuyant sur ces seuls principes, M. Poisson arrive par le calcul (*Ann. de Chimie*, t. 23, pag. 337) à une formule générale qui donne la capacité d'un gaz sous une pression quelconque, lorsqu'on connaît sa capacité sous une pression donnée, par exemple, sous la pression de $760^{mm}$. Cette formule est la suivante:

$$x = c \left(\frac{760}{p}\right)^{1-\frac{1}{k}}.$$

$c$ est la capacité du gaz par rapport à l'eau.

$p$ est la pression pour laquelle on veut connaître sa capacité.

$x$ est la capacité cherchée.

Pour l'air on a $c=0,2669$, $k=1,375$; et la formule devient

$$x = 0,2669 \left(\frac{760}{p}\right)^{1-\frac{1}{1,375}}.$$

La capacité décroît quand la pression augmente, et, sous une pression de 1000 atmosphères, elle n'est plus que $\frac{1}{25}$ à peu près de la capacité de l'eau; au contraire elle est croissante à mesure que la pression diminue, et quand elle est réduite à 4 ou 5 millimètres à peu près, la capacité de l'air devient égale à celle de l'eau. Cette propriété est, comme nous le verrons, une des principales causes du froid si étonnant qui règne dans les hautes régions de l'air.

## CHAPITRE II.

### *Du Calorique latent.*

265. *Calorique de fluidité.* — Nous avons déjà indiqué (145 et 223) les observations dans lesquelles on reconnaît l'absorption du *calorique latent* ou du *calorique de fluidité* pendant la liquéfaction des corps. Il est visible maintenant que ces quantités de chaleur peuvent être déterminées par les moyens qui viennent de nous servir à comparer les chaleurs spécifiques des corps; et entre ces moyens, le calorimètre et la méthode des mélanges seront les deux plus simples.

266. *Calorique de fluidité de la glace.* — Pour le déterminer avec précision, il suffit de prendre un poids connu de glace fondante, 1 kilogramme, par exemple, et d'y mêler très-promptement 1 kilogramme d'eau à 75°; après quelques instans, la glace est fondue, et l'on a deux kilogrammes d'eau liquide, dont la température est o, comme la température de la glace. Donc toute la quantité de chaleur qui maintenait le kilogramme d'eau à 75° au dessus de o, a été absorbée par la fusion du kilogramme de glace, et se trouve ainsi la mesure exacte de sa chaleur latente. Quand la température ambiante est plus haute que o, l'eau chaude perd de sa chaleur pendant qu'on la verse, et, au contraire, le vase où se fait le mélange reçoit du calorique extérieur pendant toute la fusion; alors on n'arrive au résultat précédent qu'après les corrections nécessaires. Dans tous les cas, il importe que le mélange se fasse promptement, et pour cela il convient de prendre de la

glace pilée, ou de la neige plutôt que de la glace compacte en un seul bloc.

La capacité de l'eau étant sensiblement constante entre o et 100°, la chaleur qui fait passer $1^{\text{kil.}}$ d'eau de o à 75° est sensiblement égale à celle qui fait passer $75^{\text{kil.}}$ d'eau de o à 1°, ou plus généralement elle est égale à celle qui fait passer $m^{\text{kil.}}$ d'eau de o à $\frac{75°}{m}$. D'après ce principe on peut varier l'expérience précédente de mille manières; et l'on peut aussi résoudre une foule de questions avec lesquelles il est bon de se rendre familier.

Par exemple : Combien faut-il mêler de glace fondante dans $10^{\text{kil.}}$ d'eau à 100°, pour réduire la température à o après la fusion complète de la glace ?

Combien faut-il de kilogrammes d'eau à 50° pour fondre $50^{\text{kil.}}$ de glace fondante, et pour que la température du mélange après la fusion complète soit de 10° ?

Lorsqu'on mêle $20^{\text{kil.}}$ d'eau à 90° avec $\frac{1}{2}^{\text{kil.}}$ de glace fondante, quelle est la température du mélange ?

Qu'arriverait-il si les $20^{\text{kil.}}$ d'eau à 90° étaient mêlés avec $100^{\text{kil.}}$ de glace fondante ?

Le calorimètre de MM. Lavoisier et de Laplace peut servir à déterminer le calorique de fluidité de l'eau; il suffit pour cela de jeter dans son intérieur une masse d'eau de poids et de température connue, et d'observer la quantité de glace fondue; $1^{\text{kil.}}$ d'eau à 10° donnerait, par exemple, $1,133^{\text{kil.}}$ d'eau à o; d'où l'on déduirait facilement que $1^{\text{kil.}}$ d'eau à 75° donnerait $2^{\text{kil.}}$ d'eau à o.

267. Le calorique de fluidité des autres substances se détermine par des procédés analogues. On admet assez généralement qu'un corps a d'autant plus de calorique de fluidité que son point de fusion est plus élevé; mais cette loi demanderait confirmation : elle repose seulement sur trois expériences de Black, qui sont sans doute assez imparfaites. Ces expériences sont relatives au spermacéti, à la cire et à l'étain. D'après Black,

1 kilogramme de spermacéti, en se congelant, pourrait fondre. . . . . . . . . . . . . . . . . . . $1^{kil.},1$ de glace.

1 kilogramme de cire.. . . . . . . . . $1^{kil.},3$

1 kilogramme d'étain . . . . . . . . . $3^{kil.},7$

268. *Calorique d'élasticité.* — Nous appellerons ainsi le *calorique latent* qu'un liquide absorbe en se vaporisant; son existence nous est démontrée par la fixité de la température pendant l'ébullition des liquides (145 et 235) et par le refroidissement produit pendant leur évaporation (241). Le calorique d'élasticité qui est propre à chaque vapeur se détermine à peu près comme le calorique de fluidité qui est propre à chaque liquide, c'est-à-dire par le calorimètre ou par la méthode des mélanges.

269. *Calorique d'élasticité de la vapeur d'eau.* — La méthode la plus ordinaire pour le déterminer consiste à faire bouillir de l'eau distillée dans un matras à long col, ou dans une cornue, et à condenser dans une masse d'eau toute la vapeur qui s'échappe; de l'augmentation de poids de cette masse d'eau on déduit la quantité de vapeur qui s'est condensée, et de l'élévation de température qu'elle prend on déduit la quantité de chaleur que cette vapeur a dégagée. Supposons, par exemple, que le vase où la vapeur se condense contienne d'abord $550^{gr.}$ d'eau à la température 0; par l'arrivée de la vapeur, son poids augmente et sa température s'élève; enfin, après un certain temps, son poids est augmenté de 100 grammes, et sa température élevée de 100°. Ces 100 grammes de vapeur condensée se retrouvant à 100° comme avant la condensation, il est évident qu'ils n'ont perdu que leur calorique d'élasticité. Donc enfin le calorique d'élasticité contenu dans 100 grammes de vapeur à 100° et sous la pression de 760°, est précisément capable d'élever 550 grammes d'eau de 0 à 100°. Un seul gramme de vapeur, dans les mêmes circonstances, ne produirait que la centième partie de cet effet, c'est-à-dire

qu'en se condensant, il éleverait de 1° la température de 550gr. d'eau. Ce résultat est en effet le nombre qu'on adopte en général, d'après les expériences de MM. Gay-Lussac, confirmées un peu plus tard par celles de MM. Clément et Desormes. Rumford avait trouvé 567 au lieu de 550, et M. Despretz trouve 530 ou 540 seulement. Une des principales causes d'erreur dans ces expériences est la quantité d'eau liquide que la vapeur entraîne avec elle lorsqu'elle vient se condenser dans la masse d'eau froide.

Pour simplifier les raisonnemens on a coutume, en parlant d'un poids donné de vapeur, de prendre pour unité de calorique la quantité de chaleur qui est nécessaire pour élever de 1° la température d'un poids égal d'eau liquide. Ainsi, de l'eau à 100° absorbe en se vaporisant 550 unités de chaleur; de l'eau à 0 en prendrait 650, savoir : 100 pour passer de 0 à 100°, en restant liquide, et 550 pour se transformer en vapeur sans changer de température.

Une question très-importante sur la vapeur d'eau est la question de savoir si les quantités de chaleur qu'elle absorbe pour se former sont indépendantes des températures auxquelles elle se forme; si, par exemple, 1 gramme d'eau prend autant de chaleur pour se vaporiser à 0 que pour se vaporiser à 100 ou à 150°. Beaucoup de recherches ont été faites sur ce point, et toutes s'accordent à établir ce principe fondamental : *que dans un gramme de vapeur au maximum de force élastique il y a toujours la même quantité de chaleur, quelle que soit la température.* Ainsi 1 gramme d'eau étant pris à 0, la somme des quantités de chaleur qu'il faudra lui donner pour l'élever à 140°, et ensuite pour le vaporiser à cette température sous la pression maximum de 3,500mm, sera sensiblement la même que la somme des quantités de chaleur qu'il aurait fallu lui donner pour l'élever à 100° et le vaporiser à cette température sous la pression maximum de 760mm, ou pour l'élever à 10° et le vaporiser à cette température sous la pression maximum

de $9^{mm},475$, ou enfin pour le vaporiser directement à 0 sous la pression maximum de $5^{mm},059$. Cette vérité semble moins étonnante lorsqu'on prend garde à la prodigieuse différence de volume que prend la vapeur dans ces différens cas: à 0, par exemple, 1 gramme de vapeur occupe un espace de 150,000 centimètres cubes, et à 150°, un espace seulement de 332 centimètres cubes. Réciproquement 1 gramme de vapeur au maximum de force élastique étant pris à une température quelconque, puis condensé et ensuite réduit à 0, dégagera toujours la même quantité de calorique, c'est-à-dire 650 unités.

Nous indiquerons ici quelques questions qui peuvent être résolues par ces principes.

On a 100 litres d'eau à 0; quel poids de vapeur faut-il y condenser pour que le mélange soit à 30°?

Dans 100 litres d'eau à 30° on remplace 10 litres d'eau chaude par 10 litres d'eau froide à 10°: combien faut-il y condenser de vapeur pour que la température soit ramenée à 30°?

Dans une masse d'eau qui est maintenue à 50°, on fait entrer de la vapeur à 100°, ayant une tension de $760^{mm}$; cette vapeur traverse un serpentin, où elle se condense en partie; ce qui ne se condense pas sort à la température de 50°, avec la tension maximum de $89^{mm}$; on demande quel est le rapport entre la vapeur qui se condense et celle qui s'échappe, et quelle est la quantité de chaleur dégagée par chaque gramme de vapeur qui entre.

270. *Calorique d'élasticité de diverses vapeurs.* — M. Despretz a fait quelques expériences pour déterminer le calorique d'élasticité des vapeurs d'alcool, d'éther sulfurique et d'essence de térébenthine.

Le résultat de ses recherches est le suivant :

| | |
|---|---|
| Alcool. . . . . . . . | 207,7 |
| Éther sulfurique. . . . | 96,8 |
| Essence. . . . . . . . | 76,8 |

C'est-à-dire que 1 gramme d'alcool en se condensant à la température de 78°,8 qui est celle de l'ébullition, abandonne assez de chaleur pour élever de 1° la température de 207,7 grammes d'eau; l'éther sulfurique ne pourrait élever de 1° que 90gr.,8 et l'essence de térébenthine 76gr.,8. Le point d'ébullition de l'éther est 35°,5; celui de l'essence 156,8. On voit que le calorique d'élasticité est moindre pour les vapeurs dont la densité est plus grande; mais il n'est pas en raison inverse des densités.

---

## CHAPITRE III.

### *De la Chaleur de combinaison et de la Chaleur animale.*

271. Toute combinaison chimique dégage de la chaleur ou du froid. Cette vérité générale est établie sur l'ensemble des faits que la chimie a pu recueillir, soit dans la nature inorganique, soit dans le développement de la végétation, soit dans l'accroissement des corps vivans et dans le renouvellement continuel de leur substance pondérable. Toutes ces quantités de chaleur dégagées ou absorbées, tantôt par l'intime union des élémens matériels, tantôt par leur ségrégation, peuvent être comparées et mesurées comme les chaleurs spécifiques ou les chaleurs latentes.

Nous nous contenterons d'indiquer ici les méthodes par lesquelles on détermine la chaleur développée par la combustion, et la chaleur développée par la respiration des animaux.

272. *Chaleur produite par la combustion.* — Pour mesurer la quantité de chaleur dégagée par la cire d'abeille, par exemple, on pèse une bougie, on l'allume et on la laisse brûler paisiblement sous la bouche du serpentin du calorimètre de Rumford (*Fig.* 216). Les produits de la combustion s'élèvent rapidement, parcourent les circonvolutions du serpentin, y déposent l'excès de leur chaleur, et sortent à la température de l'eau du calorimètre. Au commencement de l'expérience la température de l'appareil est à 5 ou 6° au dessous de la température ambiante, et à la fin

elle est à 5 ou 6° au dessus; par cette précaution on est dispensé de tenir compte de la chaleur gagnée ou perdue à l'extérieur.

Connaissant le poids du calorimètre lui-même et la capacité du cuivre dont il est fait; connaissant le poids de l'eau qu'il contient et la température à laquelle elle s'élève; connaissant enfin le poids de la cire brûlée, on peut déterminer, par le calcul et en faisant les corrections convenables, toute la quantité de chaleur que dégage 1 gramme de cire en brûlant dans l'air. On trouve ainsi que 1gr. de cire produit assez de chaleur pour élever de 1° un poids d'eau liquide d'environ 10,000gr.; on a coutume d'exprimer ce résultat d'une autre manière, en disant qu'il produit assez de chaleur pour élever de 10,000° la température de 1gr. d'eau. Le premier énoncé représente une réalité, le second est tout-à-fait conventionnel; car on ne sait ce que c'est qu'une température de 10,000°.

Le même procédé s'applique à la combustion des autres substances, mais dans tous les cas il a l'inconvénient de laisser échapper une grande partie de la chaleur rayonnante, qui traverse l'air ambiant sans être recueillie dans l'appareil.

MM. Lavoisier et de Laplace faisaient brûler les corps dans la chambre intérieure de leur calorimètre; mais il y a aussi quelque inconvénient à cette méthode, parce qu'il faut renouveler l'air qui alimente la combustion, et tenir compte des effets qu'il peut produire.

M. Despretz a aussi fait quelques expériences par une autre méthode.

Voici un tableau des résultats qui ont été obtenus. La lettre R indique les nombres de Rumford, les lettres LL ceux de MM. Lavoisier et de Laplace, et la lettre D ceux de M. Despretz.

*Tableau des quantités de chaleur dégagées par la combustion de diverses substances.*

| DÉSIGNATION DES SUBSTANCES. | ÉLÉVATION DE TEMPÉRATURE que 1 gr. de chaque substance en se brûlant avec l'oxigène communiquerait à 1 gr. d'eau. | ÉLÉVATION DE TEMPÉRATURE que 1 gr. d'oxigène en brûlant chaque substance, communiquerait à 1 gr. d'eau. |
|---|---|---|
| Fer. . . . . . . . . . . . . . | » D. | 5325 |
| Hydrogène. . . . . . . . . . | 23400° LL. | 2910 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . | » D. | 2578 |
| Huile d'olive. . . . . . . . . | 11166 LL. | 3696 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . . | 9044 R. | 2993 |
| Cire blanche. . . . . . . . . | 10500 LL. | 3355 |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . . | 9479 R. | 3029 |
| Huile de colza épurée. . . . | 9307 R. | » |
| Suif. . . . . . . . . . . . . . | 8369 R. | » |
| *Idem*. . . . . . . . . . . . . | 7186 LL. | » |
| Éther sulfurique . . . . . . . | 8030 R. | 3136 |
| Phosphore. . . . . . . . . . | 7500 LL. | 5885 |
| Charbon. . . . . . . . . . . | 7226 LL. | 2722 |
| *Idem*.. . . . . . . . . . . . | » D. | 2967 |
| Naphte. . . . . . . . . . . . | 7338 R. | » |
| Alcool à 42° Beaumé. . . . . | 6195 R. | 3019 |
| *Idem*, plus aqueux. . . . . . | 5422 R. | » |
| *Idem*, à 33°. . . . . . . . . | 5261 R. | » |
| Bois très-sec. . . . . . . . . | 4314 R. | 3093 |

273. *De la chaleur animale.* — Les corps organisés semblent se soustraire aux lois générales de la chaleur, car ils ne sont presque jamais à la température des milieux dans lesquels ils vivent. Le corps humain n'est point à la température de l'air qui l'environne : les animaux des régions polaires sont plus chauds que la glace sur laquelle ils reposent ; ceux des régions équatoriales plus froids que l'air brûlant qu'ils respirent ; les oiseaux ne sont point à la température de l'atmosphère, ni les poissons à la température de l'eau où ils sont plongés. Il y a donc dans les corps organisés quelque chaleur propre, ou plutôt quelque moyen

de produire, suivant le besoin, de la chaleur ou du froid; car la matière pondérable qui les compose doit nécessairement, comme matière pondérable, être soumise aux lois générales de l'équilibre de température. Cette question fondamentale de la chaleur des corps vivans se réduit à trois points essentiels que nous allons successivement examiner : 1°. quelle est leur température ? 2°. quelles sont les quantités de chaleur qu'ils peuvent produire dans un temps donné ? 3°. par quels moyens ces quantités de chaleur peuvent-elles être produites ?

274. *De la température du corps humain.* — La température intérieure paraît être la même dans les différens organes, et elle paraît être la même aussi que celle qu'on obtient en plaçant un petit thermomètre sous la langue, et en tenant la bouche exactement fermée pendant tout le temps que le thermomètre éprouve des variations. Cette température est de 37°; l'état de santé et de maladie, l'âge et le climat n'y peuvent produire que de légères différences. M. John Davy a fait sur ce point des observations curieuses dans le cours de ses voyages, et surtout dans une traversée des ports de l'Angleterre à l'île de Ceylan. En prenant à diverses latitudes la température de plusieurs hommes de l'équipage, il a reconnu qu'elle s'accroît en arrivant dans les pays chauds; cet accroissement toutefois est assez faible; car il ne s'élève qu'à 1° environ. En même temps M. John Davy a pris des températures sur des naturels de Ceylan, sur des Hottentots, sur des nègres de Madagascar et de Mozambique, sur des Albinos, sur des Malais, sur des Cipayes, sur des prêtres de Boudha, qui ne mangent que des légumes, et sur des Vaida, qui ne mangent que de la viande. Toutes ces températures sont très-peu différentes; la plus basse de toutes est de 35,8; elle appartient à deux Hottentots du cap de Bonne-Espérance : la plus élevée se trouve de 38,9; elle appartient à deux enfans d'Européens, nés à Colombo, l'un de huit ans et l'autre de douze.

755. *Température des animaux.* — M. John Davy a fait encore sur ce point la série d'observations la plus complète qui nous soit connue, et sans doute aussi la plus exacte. Voici le tableau de ses résultats,

*Tableau des températures de divers animaux, observées par M. John Davy.*

| NOM DE L'ANIMAL. | SA TEMPÉR. EN DEGRÉS CENTIGR. | TEMPÉRATURE AMBIANTE. | LIEU DE L'OBSERVATION. |
|---|---|---|---|
| | *Mammifères.* | | |
| Singe | + 39°,7 | + 30° | Colombo. |
| Pangolin | 26,7 | 27 | *Idem.* |
| Chauve-souris | 37,8 | 28 | *Idem.* |
| *Idem* | 38,3 | 28 | *Idem.* |
| V. vampirus | 37,8 | 21 | *Idem.* |
| Écureuil | 38,8 | 27 | *Idem.* |
| Rat commun | 38,8 | 26,5 | *Idem.* |
| Lièvre commun | 37,8 | 26,5 | *Idem.* |
| Ichneumon | 39,4 | 27 | *Idem.* |
| Tigre | 37,2 | 26,5 | *Idem.* |
| Chien | 39,0 | » | Kandy. |
| *Idem* | 39,6 | » | *Idem.* |
| Jackal | 38,3 | 29 | Colombo. |
| Chat commun | 38,3 | 15 | Londres. |
| *Idem* | 38,9 | 26 | Kandy. |
| Panthère | 38,9 | 27 | Colombo. |
| Cheval (race arabe) | 37,5 | 26 | Kandy. |
| Mouton | 39,3 à 40,0 | En été. | Écosse. |
| *Idem* | 39,5 à 40,0 | 19 | Cap de Bonne-Espér. |
| *Idem* | 40,0 à 40,5 | 26 | Colombo. |
| Bouc | 39,5 | 26 | *Idem.* |
| Chèvre | 40,0 | 26 | *Idem.* |
| Bœuf | 38,9 | En été. | Edimbourg. |
| *Idem* | 38,9 | 26 | Kandy. |
| Élan femelle | 39,4 | 25,6 | Colombo. |
| Porc | 40,5 | 25,6 | Dans le Doombera. |
| Éléphant | 37,5 | 26,7 | Colombo. |
| Marsoin | 37,8 | 23,7 | En mer; lat. 8° 23′ N. |
| | *Oiseaux.* | | |
| Milan | 37,2 | 25,3 | Colombo. |
| Cat-huant | 40,0 | 15,6 | Londres. |
| Perroquet | 41,1 | 24 | Kandy. |
| Choucas | 42,1 | 31,5 | Ceylan. |
| Grive commune | 42,8 | 15,5 | Londres. |
| Moineau commun | 42,1 | 26,6 | Kandy. |
| Pigeon commun | 42,1 | 15,5 | Londres. |
| *Idem* | 43,0 | 25,5 | Colombo. |

| NOM DE L'ANIMAL. | SA TEMPÉR. EN DEGRÉS CENTIGR. | TEMPÉRATURE AMBIANTE. | LIEU DE L'OBSERVATION. |
|---|---|---|---|
| Pigeon commun. . . | 43,3 | 25,5 | Colombo. |
| Poule de Jungles. . | 42,0 | 25,5 | Ceylan. |
| *Idem*. . . . . . . . | 42,5 | 25,5 | *Idem.* |
| Poule commune. . . | 42,5 | 4,5 | Édimbourg. |
| *Idem*. . . . . . . . | 43,3 | 25,5 | Colombo. |
| *Idem*. . . . . . . . | 42,2 | 25,5 | *Idem.* |
| Coq vieux. . . . . . | 43,3 | 25,5 | *Idem.* |
| Coq adulte. . . . . . | 43,9 | 25,5 | *Idem.* |
| Poule de Guinée. . | 43,9 | 25,5 | Près de Colombo. |
| Coq d'Inde. . . . . | 42,7 | 25,5 | *Idem.* |
| Pétrel . . . . . . . . | 40,3 | 26 | En mer; lat. 2° 3' N. |
| P. Capensis. . . . . | 40,8 | 15 | *Idem*; lat. 34° S. |
| Oie commune. . . . | 41,7 | 25,5 | Près de Colombo. |
| Canard commun . . | 43,9 | 25,5 | *Idem.* |
| *Amphibies.* | | | |
| Tortue. . . . . . . . | 28,9 | 26 | En mer; lat. 2° 27' N. |
| *Idem*. . . . . . . . | 29,4 | 32 | Colombo. |
| T. Geometrica. . . . | 16,9 | 16 | Cap de Bonne-Espér. |
| *Idem*. . . . . . . . | 30,5 | 26,6 | Colombo. |
| Rana Ventricosa. . . | 25,0 | 26,7 | Kandy. |
| Iguana. . . . . . . . | 29,0 | 27,8 | Colombo. |
| Serpent . . . . . . . | 31,4 | 27,5 | *Idem.* |
| *Idem* . . . . . . . | 29,2 | 28,1 | *Idem.* |
| *Idem*. . . . . . . . | 32,2 | 28,3 | *Idem.* |
| *Poissons.* | | | |
| Requin. . . . . . . . | 25,0 | 23,7 | En mer; lat. 8° 23' N. |
| Bonite, au cœur. . . | 27,8 | 27,2 | *Idem*, lat. 1° 14' S. |
| — dans les musc. intér. | 37,2 | 27,2 | *Idem.* |
| Truite commune. . . | 14,4 | 13,3 | Près Édimbourg. |
| Poisson volant. . . . | 25,5 | 25,3 | En mer; lat. 6° 57' N. |
| *Mollusques.* | | | |
| Huitre commune . . | 27,8 | 27,8 | Près de Colombo. |
| Limaçon. . . . . . . | 24,6 | » | Kandy. |
| *Crustacés.* | | | |
| Écrevisse . . . . . . | 26,1 | 26,7 | Colombo. |
| Crabe . . . . . . . . | 22,2 | 22,2 | Environs de Kandy. |
| *Insectes.* | | | |
| Scarabée. . . . . . . | 5,0 | 24,3 | Kandy. |
| Ver-luisant. . . . . | 23,3 | 22,8 | *Idem.* |
| Blatta orientalis. . . | 23,9 | 28,3 | *Idem.* |
| *Idem* . . . . . . . | 23,9 | 23,3 | *Idem.* |
| Grillon. . . . . . . . | 22,5 | 16,7 | Cap de Bonne-Espér. |
| Guêpe. . . . . . . . | 24,4 | 23,9 | Kandy. |
| Scorpion. . . . . . . | 25,3 | 26,1 | *Idem.* |
| Julus. . . . . . . . . | 25,8 | 26,6 | *Idem.* |

*Remarques.* — Pour les amphibies, le nombre qui se trouve dans la colonne de la *température ambiante* est la température de l'air; pour les poissons, l'huître commune et le crabe, c'est la température de la mer.

On voit que les oiseaux sont de tous les animaux ceux dont la température est la plus élevée; les mammifères occupent le second rang; viennent ensuite les amphibies, les poissons et certains insectes; la dernière classe comprend les mollusques et les crustacés, qui sont sensiblement à la température ambiante, ainsi que les vers sur lesquels on a jusqu'à présent fait des expériences.

La bonite offre un exemple remarquable; la mer étant à 27,2, la température de la bonite s'est trouvée de 27°,8 au cœur, et de 37,2 dans les muscles intérieurs; le cœur est très-près de la surface.

276. *Quantités de chaleur produites par divers animaux.*—Ces quantités de chaleur peuvent être déterminées par le calorimètre, et MM. Lavoisier et de Laplace n'avaient pas manqué d'appliquer leur instrument à ce genre de recherches. Dernièrement M. Dulong a employé un autre moyen, qui est sans doute le plus précis et le plus ingénieux que l'on puisse imaginer; son beau travail sur ce sujet n'est point encore publié, et nous ne pourrons donner ici qu'une idée générale de son appareil et de ses résultats. L'animal que l'on soumet à l'épreuve est enfermé, fort à son aise, dans une caisse en cuivre mince, qui est plongée dans une grande masse d'eau; l'air nécessaire à la respiration lui est fourni par un gazomètre; les produits de la respiration sont conduits au dehors; ils sortent à la température de la masse d'eau; ils sont recueillis et analysés. L'expérience dure environ deux heures, et par l'élévation de température de l'eau, on juge, après avoir fait toutes les corrections, quelle est la quantité de chaleur qui a été fournie par l'animal en expérience. M. Dulong a déterminé ces quantités de chaleur avec une grande précision, sur des individus de différentes

espèces, jeunes ou adultes, carnivores ou frugivores. Ces animaux n'ayant à souffrir ni gêne ni fatigue, on conçoit que s'ils perdent de la chaleur à chaque instant, il faut qu'à chaque instant ils en reproduisent en égale quantité, et nous allons voir par quels moyens.

277. *Causes principales de la chaleur des animaux.*— L'air qui a servi à la respiration est altéré comme l'air qui a servi à la combustion. L'oxigène s'est en partie combiné avec du carbone, pour former de l'acide carbonique; donc il se fait dans les poumons une véritable combustion. Quand Lavoisier eut fait cette découverte, la chaleur animale ne fut plus un mystère : on en vit la source dans le phénomène de la respiration. Cependant il faut mesurer cette source et savoir si, à elle seule, elle compense exactement les pertes; c'est ce qu'a fait M. Dulong. Après avoir déterminé, comme nous venons de le voir, la quantité de chaleur perdue par un animal dans un temps donné, il a cherché la quantité de chaleur produite par la respiration. L'air qui est fourni à l'animal est mesuré par le gazomètre; les altérations qu'il éprouve sont données par l'analyse. Voici quelles elles sont : 1° il sort plus humide; 2° une partie de l'oxigène est remplacée par de l'acide carbonique; 3° une autre portion de l'oxigène disparaît; 4° l'azote n'éprouve que de faibles variations. Admettant que l'oxigène qui est passé à l'état d'acide carbonique s'est réellement combiné avec du carbone pendant l'inspiration, ou après avoir été absorbé, on peut calculer la quantité de chaleur qui en résulte. Admettant ensuite que la quantité d'oxigène qui a disparu s'est combinée avec de l'hydrogène pour former de l'eau, on peut pareillement calculer la quantité de chaleur qui en résulte. La somme de ces deux quantités de chaleur représente certainement toute la chaleur que la respiration peut produire; or, cette somme représente, dans certains cas, les $\frac{9}{10}$ de la chaleur perdue par l'animal, et, dans d'autres cas, les $\frac{8}{10}$ seulement. Tel

est le résultat curieux auquel M. Dulong a été conduit. Il paraît donc qu'il y a dans les animaux, outre la respiration, quelque autre source de chaleur. Il reste à savoir si elle se trouve dans les sécrétions diverses qui se font à chaque instant, ou si elle est plus cachée et dépendante de l'action plus ou moins énergique du système nerveux.

—

## CHAPITRE IV.

### *Des sources de chaleur et de froid.*

278. *De la chaleur des gaz soumis à des actions mécaniques.* — Tous les gaz dégagent de la chaleur par la compression. L'expérience en peut être faite au moyen d'un appareil semblable au briquet à air (*Fig.* 1). Le gaz que presse le piston étant de l'air atmosphérique, ou de l'oxigène, tout le monde sait qu'une vive pression dégage assez de chaleur pour enflammer de l'amadou. Les autres gaz ne produisent pas l'inflammation parce qu'ils ne sont pas des corps *comburens*, mais tous s'échauffent, et trois d'entre eux, l'air, l'oxigène et le chlore, par une compression forte et subite s'échauffent assez pour devenir lumineux dans les ténèbres. On avait admis ce résultat comme une propriété caractéristique des gaz dont il s'agit; mais M. Thenard a démontré dernièrement, par une série d'expériences curieuses, que ces gaz ne deviennent lumineux que parce qu'ils se combinent avec la graisse du piston, ou avec quelques autres corps étrangers. (*Ann. de chim. et de phys.*, tom. XLIV, *pag.* 181.)

Réciproquement tous les gaz produisent du froid par l'expansion. Pour s'en assurer, on suspend un thermomètre au milieu d'une cloche ou d'un ballon dont on aspire l'air par la machine pneumatique. Dès le premier coup de piston, le thermomètre descend; s'il a peu de masse et une grande sensibilité, on peut le faire descendre ainsi à 8 ou 10° au dessous de la température ambiante. Les autres gaz produisent des effets analogues.

Il paraît que ce double effet se produit dans les appareils à gaz portatif pour l'éclairage; ces appareils sont de forts cylindres, de deux ou trois pieds de long, terminés aux deux bouts par des hémisphères; lorsqu'on les met en communication avec le gazomètre pour les remplir sous une trentaine d'atmosphères, on observe un abaissement de température à l'extrémité par laquelle entre le gaz, et une élévation de température à l'extrémité opposée.

Ces deux phénomènes de production et d'absortion de chaleur s'expliquent d'une manière satisfaisante par les changemens de capacité qui accompagnent dans les gaz les changemens de densité. En supposant que la compression ou l'expansion se fasse dans un vase imperméable à la chaleur, M. Poisson arrive à la formule suivante pour exprimer les variations de température qui correspondent aux variations de volume:

$$x = (266^\circ{,}67 + t)\left(\frac{d'}{d}\right)^{\kappa - 1} - 266^\circ{,}67.$$

$t$ est la température primitive du gaz;
$d$ sa densité primitive;
$d'$ sa densité après la compression ou l'expansion;
$x$ sa température correpondante à la densité $d'$;
$k$ le rapport de sa capacité sous une pression constante, à sa capacité sous un volume constant (264); pour l'air, sa valeur est 1,375.

M. Gay-Lussac a observé, sur la chaleur des gaz, deux autres phénomènes qui sont plus difficiles à expliquer.

1°. L'air qui s'échappe d'un vase en soufflant par une ouverture, sous une pression quelconque, ne change pas de température, quoiqu'il se dilate en sortant du vase;

2°. Le vide étant fait dans un ballon, ou l'air étant seulement raréfié, la rentrée de l'air extérieur produit une élévation de température de plusieurs degrés.

Le premier de ces faits mérite toute l'attention des phy-

siciens; il semble indiquer qu'il y a de la chaleur produite dans le souffle de l'air, et que cette chaleur est d'autant plus considérable que la différence de pression qui produit le souffle est plus grande, de telle manière que le réchauffement compense exactement le froid produit par l'expansion. Ainsi le second fait s'expliquerait par le premier.

Quelques physiciens avaient pensé que, si l'air s'échauffe en rentrant dans le vide, c'est que le vide est rempli de chaleur, non-seulement de chaleur rayonnante, mais encore d'une chaleur particulière et inhérente que l'air s'approprie lorsqu'il vient remplir l'espace. Cette conjecture semble tout-à-fait détruite par une belle expérience de M. Gay-Lussac. Si du calorique inhérent existait dans le vide, en réduisant l'espace subitement, la température du vide devrait augmenter, comme dans le cas où l'air y pénètre. Or, après avoir fait un baromètre à large colonne, dans la chambre duquel il met un thermomètre très-sensible, M. Gay-Lussac fait alternativement monter et descendre le mercure par un mouvement très-prompt, pour diminuer ou agrandir l'étendue du vide, et jamais ces changemens ne sont accompagnés des moindres variations de température.

278. *De la percussion.*—Tout le monde sait qu'un métal s'échauffe lorsqu'on le bat sur l'enclume, ou lorsqu'on le comprime par le choc du balancier. Il était curieux d'observer si ce dégagement de chaleur est accompagné d'une réduction de volume permanente; car si le corps, un instant refoulé sur lui-même, revenait à ses dimensions primitives, on ne verrait plus de raison à la production de la chaleur. Or, il résulte de quelques expériences de MM. Berthollet, Biot et Pictet, que le cuivre et l'argent, qui dégagent beaucoup de chaleur sous un premier coup de balancier, en dégagent moins sous le second coup, et moins encore sous le troisième. Enfin, quand ils sont tellement écrouis que leurs molécules ne puissent plus se rapprocher

davantage d'une manière permanente, les chocs les plus violens ne produisent plus d'élévation de température. A ce point de condensation, ils sont analogues aux liquides; sans doute ils peuvent bien encore être comprimés, mais ils reviennent à l'instant; et la chaleur qu'ils dégagent dans cette compression instantanée est égale à celle qu'ils absorbent dans l'expansion qui la suit.

279. *Du frottement.* — Les métaux, le bois et tous les corps solides dégagent de la chaleur par le frottement: une roue prend feu lorsqu'elle tourne rapidement sur son essieu; les tourillons des rouets, dans les machines à rotation, s'échauffent au point d'enflammer leurs supports; le bois lui-même s'allume en frottant sur du bois, et ce moyen de produire du feu est, comme on sait, le seul briquet des sauvages; deux morceaux de glace au dessous de 0, frottés vivement, donnent assez de chaleur pour se fondre à leur surface. Tous ces phénomènes donnent lieu à une question importante, savoir : si les dégagemens de chaleur qu'on observe dans le frottement résultent d'une compression permanente des corps frottés, ou si le mouvement de vibration imprimé à leurs molécules n'est pas lui-même une cause de chaleur. Il est difficile de faire sur ce point des expériences décisives. Cependant, les quantités de chaleur produites par le frottement et par la ségrégation des molécules sont souvent si considérables, que nous devons, avec Rumfort et plusieurs physiciens, en attribuer au moins une partie aux mouvemens de vibrations des molécules frottées. Parmi toutes les expériences qui favorisent cette opinion, nous nous contenterons de citer les suivantes.

Un alliage composé d'une partie de fer et de deux d'antimoine donne, sous la lime, de vives étincelles de feu; ainsi, les parcelles de limaille sont, par le frottement, portées à la température de la combustion. Dans le jeu du briquet ordinaire, les aspérités tranchantes du silex tracent

un sillon dans l'acier, et en détachent des parcelles qui sont pareillement assez échauffées pour s'enflammer dans l'air, et pour tomber en globules arrondis par la fusion, et en partie brûlés. Au fond d'un canon de bronze, tourné verticalement et rempli d'eau, Rumford a fait jouer un foret très-vivement et sous une grande pression; dans l'espace de deux heures, 4145 grains (poids anglais) de bronze ont été réduits en poudre, et la chaleur dégagée a été capable de faire passer 26 livres d'eau de 0 à 100°. Cette chaleur ne provenait pas sans doute d'un changement de densité dans la masse de bronze, ou dans la limaille détachée, car cette limaille avait sensiblement la même capacité pour la chaleur que le bronze en masse.

280. *Des changemens d'état.* — Nous avons vu que les changemens d'état des corps donnent naissance à des absorptions et à des dégagemens de chaleur dont il est facile d'avoir les mesures exactes; mais on éprouve de grandes difficultés lorsqu'on essaie d'expliquer ces phénomènes par les différentes capacités pour la chaleur que prennent les corps dans les divers états, de solide, de liquide ou de vapeur.

281. *Des actions moléculaires.* — Tout corps solide dégage de la chaleur à l'instant où il est *mouillé* par un liquide. Cette vérité générale résulte d'une série d'expériences que j'ai faites en 1822. Les liquides étaient l'eau, l'huile, l'alcool et l'éther acétique; les solides appartenaient au règne inorganique et au règne organique; ils avaient été réduits en poudre pour que l'effet fût plus sensible. Dans la multitude de ceux qui ont été essayés, il ne s'en est pas présenté un seul qui fît exception à la loi. Le plus souvent l'élévation de température n'était que de $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{5}$ de degré; quelquefois elle s'élevait jusqu'à 10°. L'action moléculaire qui s'exerce dans ces circonstances, entre le solide et le liquide, n'est point une action chimique; elle ne s'exerce à la fois que sur une très-faible partie de la masse,

et l'on voit cependant quelle quantité de chaleur elle dégage; il faut bien que les molécules qui sont en jeu pour produire cette action se trouvent elles-mêmes à des températures très-hautes. Ces effets sont, il me semble, la plus forte preuve que les vibrations moléculaires dégagent de la chaleur.

282. *De l'ignition spontanée.*—Nous appellerons ainsi le phénomène curieux découvert par Dœbereiner, en 1823. Ce phénomène est le suivant : du platine, en fil très-fin, en poudre, en feuille, ou en *éponge,* étant à la température ordinaire, si on le plonge dans un mélange d'hydrogène et d'air, pareillement à la température ordinaire, il suffit d'un instant pour qu'il y ait une vive ignition. Le platine devient chaud, rouge, rouge-blanc; l'hydrogène brûle, et la combustion continue tant qu'il y a des élémens combustibles en présence. Quelle est la cause qui détermine d'abord l'élévation de température? Les physiciens et les chimistes ont émis sur ce point des opinions très-diverses; celle qui me semble la plus probable, c'est que le mélange gazeux exerce sur le métal divisé une action pareille à celle des liquides sur les corps qu'ils mouillent; que cette *action moléculaire* produit, aux points où elle s'exerce, une assez haute chaleur pour déterminer la combinaison de l'hydrogène avec l'oxigène, et que, la combustion une fois commencée, elle se continue d'elle-même par la chaleur qu'elle produit.

On fait ces expériences d'une manière commode avec la lampe de M. Gay-Lussac (*Fig.* 155); il suffit de présenter au courant d'hydrogène quelques fragmens de platine divisé, et sans étincelle électrique on voit jaillir la flamme.

MM. Dulong et Thenard ont fait sur ce sujet de nombreuses expériences, desquels il résulte :

1°. Que le palladium, le rhodium et l'irridium se comportent comme le platine.

2°. Que l'osmium agit aussi, mais à 45°, et l'or à 120.

3°. Que le charbon, le verre, la pierre ponce et la porcelaine agissent pareillement, mais à des températures voisines de 250°.

4°. Que tous ces corps perdent la propriété dont il s'agit par un trop long séjour dans l'air, mais qu'il suffit de les calciner pour la leur rendre.

283. *Des combinaisons.* — Les combinaisons chimiques sont, à la surface de la terre, la source la plus abondante de chaleur. Nous avons vu (271) comment on mesure les quantités qu'elles en fournissent; mais la cause elle-même qui produit ces effets n'est pas aussi facile à découvrir. On a supposé long-temps que la chaleur dégagée ou absorbée dans les combinaisons provenait du changement d'état des élémens constituans, ou du rapport entre leurs capacités, pour la chaleur et la capacité du composé; mais ni les changemens d'état, ni les variations de capacité ne peuvent rendre compte des faits, et ce point est peut-être, dans toute la théorie de la chaleur des combinaisons, le seul qui soit bien établi.

284. *Des mélanges réfrigérans.* — Nous avons indiqué d'une manière générale (223) la cause du froid produit par les mélanges réfrigérans. Comme on peut avoir besoin de s'en servir dans une foule d'expériences, nous donnerons ici un tableau de ces mélanges, tiré de la Chimie de M. Thenard.

*Tableau des mélanges réfrigérans.*

| MÉLANGES DE NEIGE ET DE SEL, OU D'ACIDE ÉTENDU, OU D'ALCALI. | | ABAISSEMENT DU THERMOMÈTRE. |
|---|---|---|
| Neige<br>Sel marin | 1<br>1 | de 0° à — 17,77 |
| Hydro-chlorate de chaux<br>Neige | 3<br>2 | de 0 à — 27,77 |
| Potasse<br>Neige | 4<br>3 | de 0 à — 28,33 |
| Neige<br>Acide sulfurique étendu | 1<br>1 | de — 6,66 à — 51 |
| Neige ou glace pilée<br>Sel marin | 2<br>1 | de — 17,77 à — 20,55 |
| Neige et acide nitrique étendu | | de — 17,77 à — 43,33 |
| Hydro-chlorate de chaux<br>Neige | 2<br>1 | de — 17,77 à — 54,44 |
| Neige ou glace pilée<br>Sel marin<br>Hydro-chlorate d'ammoniaque et nitrate de potasse | 1<br>5<br>5 | de — 20,55 à — 27,77 |
| Neige<br>Acide sulfurique étendu<br>Acide nitrique étendu | 2<br>1<br>1 | de — 23,33 à — 48,88 |
| Neige ou glace pilée<br>Sel marin<br>Nitrate d'ammoniaque | 12<br>5<br>5 | de — 27,77 à — 31,66 |
| Hydro-chlorate de chaux<br>Neige | 3<br>1 | de — 40 à — 58,33 |
| Acide sulfurique étendu<br>Neige | 10<br>8 | de — 55,55 à — 68,33 |

285. Pour compléter l'énumération des sources de chaleur, nous devons indiquer encore la chaleur produite par l'électricité, et celle qui est produite par la lumière solaire ; nous parlerons de la première dans le livre suivant, et de la seconde dans la Météorologie.

# APPENDICE.

## CONSTRUCTION DES MACHINES A VAPEUR.

286. *Formation de la vapeur.* — La *figure* 229 représente une chaudière à vapeur sur son fourneau ; le feu en frappe le fond et les faces latérales, dans la plus grande hauteur possible; car la quantité de vapeur produite dans un temps donné est proportionnelle à l'étendue de la chaudière qui est immédiatement chauffée.

D est le tuyau par lequel s'échappe la vapeur pour aller produire son effet mécanique, comme nous le verrons plus loin.

E est la soupape du *modérateur;* elle s'ouvre ou se ferme au moyen d'une tige extérieure, et modère la dépense.

La vapeur se formant sans cesse, il faut que l'eau arrive sans cesse dans la chaudière, et elle arrive d'elle-même par la disposition suivante :

*i i* est un flotteur; c'est une large pierre qui est soutenue à la surface de l'eau.

J J est le fil de métal qui soutient le flotteur ; il sort de la chaudière par l'ouverture J qu'il remplit exactement, mais dans laquelle il peut glisser.

K K′ est un levier; à son extrémité K vient s'attacher le fil du flotteur, et à son extrémité K′ s'attache la tige de la soupape M.

M, soupape qui se lève quand le flotteur descend, et qui se ferme quand il remonte.

H H, réservoir alimentaire. Quand la soupape M se lève, l'eau de ce réservoir descend dans le tuyau I I.

I I, tuyau alimentaire qui amène l'eau du réservoir jusqu'au fond de la chaudière.

O, cylindre de fer en forme de seau, soutenu par la chaîne P P qui passe sur deux poulies, et qui s'attache à un *registre*.

Si la pression de la vapeur est trop forte, elle refoule l'eau de la chaudière dans le tuyau alimentaire I I, le seau de fer O est soulevé, et le registre descend pour fermer plus ou mois l'ouverture de la cheminée, et modérer ainsi l'activité du feu.

S est une soupape de sûreté; quand elle est soulevée par un excès de pression, la vapeur qu'elle dégage passe dans la cheminée par un tuyau latéral.

F F sont deux robinets d'épreuve.

B C est le manomètre qui marque la tension de la vapeur; on le voit plus en grand au dessus de la place qu'il occupe dans la figure 229.

C' est le *trou de l'homme*; c'est une ouverture par laquelle les ouvriers descendent dans la chaudière pour la réparer ou pour la nettoyer.

V est un robinet pour vider la chaudière.

Il y a des chaudières d'une tout autre forme. Les figures 230 et 231 représentent la chaudière qu'on appelle le *bouilleur*, de Wolf; elle se compose de huit cylindres en fonte (*Fig.* 231) disposés horizontalement et *en croix* au-dessous d'un grand cylindre horizontal A A (*Fig.* 230) auquel ils communiquent par des tubes verticaux. Le foyer est en B, et la flamme passe alternativement au dessous d'un tuyau et au dessus du suivant; de cette manière on a une très-grande surface en contact avec le feu. La vapeur formée dans les bouilleurs s'élève pour aller produire son effet mécanique; et une pompe foulante refoule sans cesse de l'eau pour la remplacer.

287. *Action de la vapeur.* — La figure 238 représente une machine de Watt. La vapeur, formée comme nous

venons de le dire, s'échappe de la chaudière par le modérateur, et vient se répandre dans le corps de pompe C C, pour produire son effet mécanique sur le piston P′. La vapeur arrive, agit et se détruit; et tout ces phénomènes se produisent d'eux-mêmes avec une régularité merveilleuse que nous allons essayer de faire comprendre.

P′ est le piston. On voit dans la figure 232 le détail de sa construction. Les figures 233, 234 et 235 représentent des pistons de différentes espèces.

*t*, tige du piston.

C C, cylindre ou corps de pompe, parfaitement *rodé*, dont le piston parcourt toute la longueur, alternativement, de haut en bas et de bas en haut. Il y a deux ouvertures *u* et *v* par chacune desquelles la vapeur peut entrer et sortir.

C′C′, autre cylindre que nous appellerons *enveloppe*, parce qu'il enveloppe en effet le cylindre C C; il reste entre eux un espace annulaire dont on voit la largeur dans la figure; c'est là que la vapeur arrive directement en sortant de la chaudière. Il n'y a point de communication immédiate entre l'espace annulaire et le cylindre C C. (*Voyez* le plan, *Fig.* 239.)

T est le *tiroir*, qui est représenté plus en grand dans les figures 236 et 237. On en voit le plan en T, *Fig.* 239. C'est un demi-cylindre vertical qui peut monter et descendre. Dans la figure 236, il est au dessus de sa course, et il est au bas dans la figure 237. Il y a dans le tiroir des appendices en D′ et en D″, *Fig.* 237, qu'il est important de considérer. Quand D′ est au dessous de l'ouverture *u* *Fig.* 237, D″ est au dessous de l'ouverture *v*; de même quand D′ est au dessus de l'ouverture *u*, D″ est aussi au dessus de l'ouverture *v*.

S, *Fig.* 236, 237, 238, est une soupape toujours ouverte; c'est un autre modérateur par lequel la vapeur sort de l'espace annulaire pour passer au dessus ou au dessous

du piston ; au dessus, quand le tiroir est au dessus de sa course, *Fig.* 236, et au dessous quand il est au bas de sa course, *Fig.* 237.

K, *condenseur* où la vapeur arrive par les conduits $v''$ et $v'$; l'eau échauffée par la condensation de la vapeur passe par la soupape E, et se trouve enlevée par la pompe d'épuisement *pp*.

Dans la position que représente la figure 238, le piston P′ est en chemin pour descendre; le tiroir T est au dessus de sa course, comme dans la figure 236; la vapeur arrivée de la chaudière dans l'espace annulaire passe par la soupape s, entre par l'ouverture *u*, se répand dans le cylindre cc, et presse le piston pour le forcer à descendre; en même temps l'ouverture $v$ est libre, l'espace qui est au dessous du piston communique au condenseur par les conduits $v'$ et $v''$, et déjà toute la vapeur est condensée, et le piston peut descendre librement.

Quand le piston sera au bas de sa course, le tiroir descendra pour prendre la position de la figure 237; la communication sera fermée entre la soupape s et l'ouverture *u*; au contraire, elle sera établie entre la soupape s et l'ouverture $v$; ainsi, d'une part, la vapeur qui est au dessus du piston ira se liquéfier dans le condenseur, en passant de *u* en $v'$ et $v''$; et, d'une autre part, la vapeur affluant par l'ouverture $v$ fera, sans obstacle, remonter le piston jusqu'au dessus de sa course.

Voilà comment s'établit le jeu alternatif du piston; et les pièces de la machine sont combinées avec tant d'art et de génie que, l'impulsion une fois donnée, la main de l'homme peut se reposer; chaque levier se lève à son tour, à l'instant où il doit agir, et tous ces mouvemens, si nombreux, si variés, si compliqués, s'accomplissent d'eux-mêmes avec une admirable précision.

288. *Communication du mouvement.* — La force de la vapeur est maintenant dans la tige du piston; c'est là qu'il

faut la prendre pour la faire passer jusqu'au lieu où elle doit agir, soit à l'extrémité de la roue du bateau à vapeur, soit sur le grain de blé qui doit être moulu, soit dans les cylindres qui doivent laminer les métaux, soit aux instrumens tranchans qui doivent façonner le bois et faire des pièces de menuiserie, etc., etc.

MNOL est un rectangle dont les angles sont mobiles, et qui s'attache à l'extrémité L du levier LL'.

LL', levier mobile autour de l'axe X.

F, bielle solide, qui s'attache à la manivelle G, et au moyen de laquelle l'axe Y, qu'on appelle *arbre de couche*, reçoit un mouvement de rotation.

VV, volant destiné à régulariser le mouvement.

Le mouvement alternatif du piston pressé par la vapeur, se trouve ainsi transformé en un mouvement de rotation continu et uniforme, imprimé à l'arbre de couche; c'est là qu'on le prend ensuite pour le transmettre, par les moyens mécaniques ordinaires, jusqu'à la résistance qu'il doit vaincre.

FIN DE LA PREMIÈRE PARTIE

DES ÉLÉMENS DE PHYSIQUE ET DE MÉTÉOROLOGIE.

# TABLE

## DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LA PREMIÈRE PARTIE DU PREMIER VOLUME.

### NOTIONS PRÉLIMINAIRES.



### LIVRE PREMIER.

DE LA PESANTEUR.



### LIVRE DEUXIÈME.

DE LA CHALEUR.

## PREMIÈRE PARTIE.

### *Dilatation.*



## DEUXIÈME PARTIE.

### *Changement d'État des Corps.*



## TROISIÈME PARTIE.

### *De la Communication du Calorique.*



## QUATRIÈME PARTIE.

### *De la Mesure de la Chaleur, et des causes qui la produisent.*



## APPENDICE.



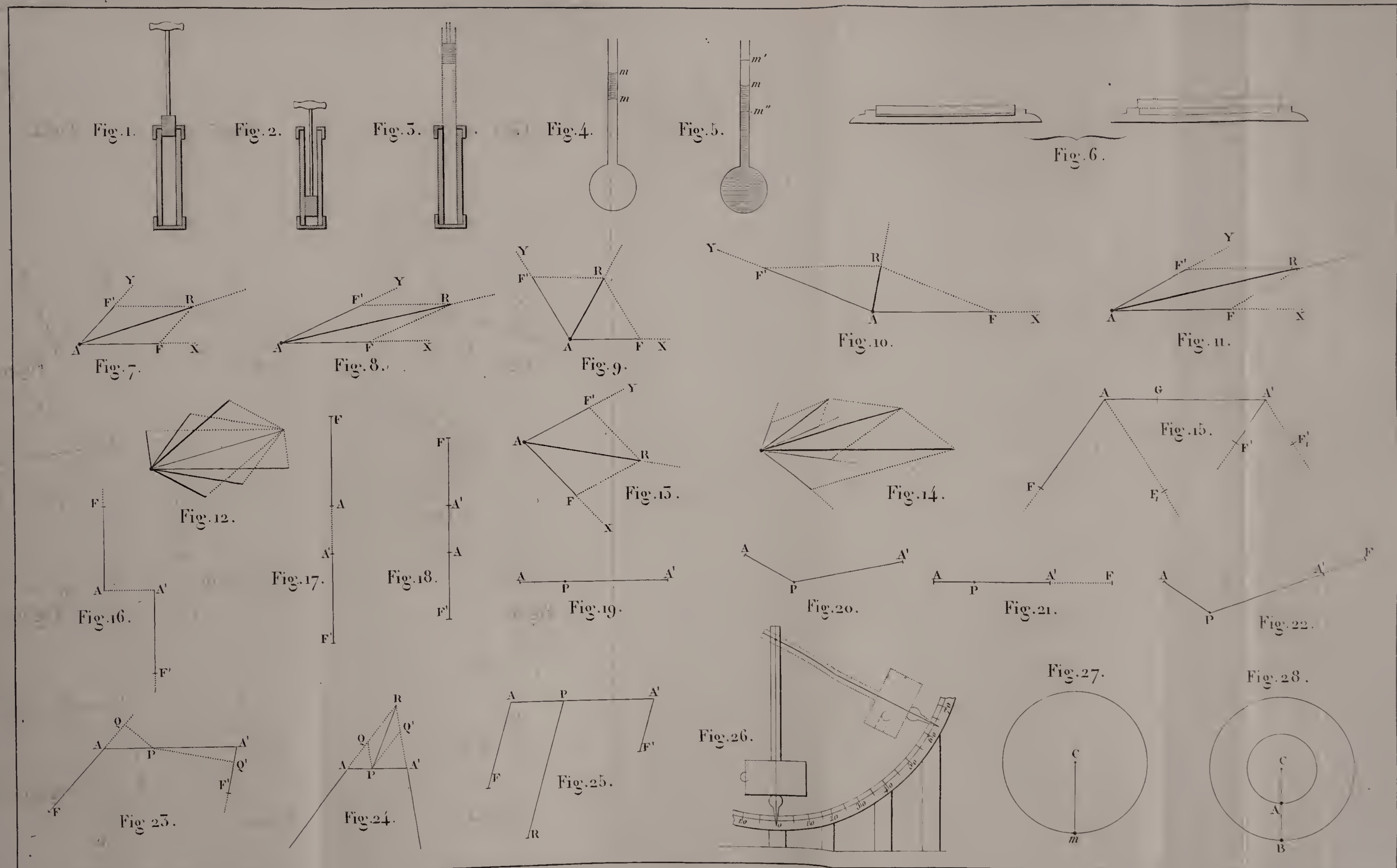
FIN DE LA TABLE.

# *ERRATA DU PREMIER VOLUME.*

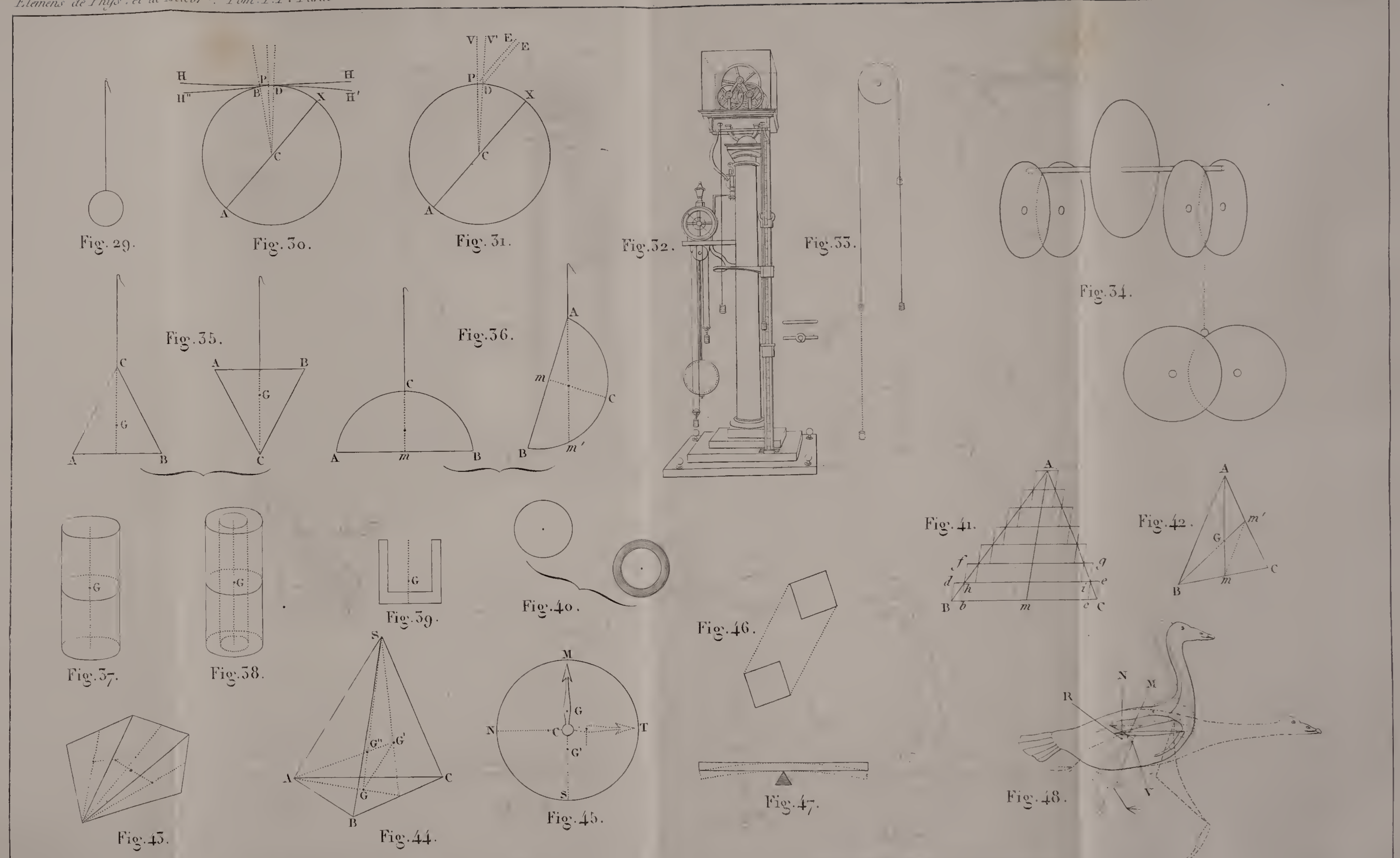
## PREMIÈRE PARTIE.

Page 13, lig. 25, le vaste orbite, *lisez* la vaste orbite.
30, 25, les édifices, *lisez* des édifices.
32, 15, le réduire, *lisez* l'enfoncer.
33, 22, *effacez* ne.
40, 17 et 18, celles qui font un angle aigu droit ou obtus, comme pour celles qui font un angle quelconque, *lisez* celles qui font un angle droit ou obtus, comme pour celles qui font un angle aigu quelconque.
41, *dernière*, C A, *lisez* G A.
43, 6, le bras du levier dans la seconde, *lisez* le bras de levier de la seconde.
44, 32, 145 fois, *lisez* 45 fois.
45, 13, l'inertie, *lisez* inertie.
52, 11, le poids, *lisez* la masse.
55, 5, dépendant, *lisez* dépendent.
62, 23, de la stabilité de la terre, *lisez* la stabilité de la terre.
76, 29, tournant d'un axe, *lisez* tournant autour d'un axe.
77, 1, inférieur, *lisez* inférieure.
81, 6, stable ou instable, *lisez* instable ou stable.
85, 12, verticale, *lisez* horizontale.
88, 1, en obtenir la résultante, *lisez* obtenir la résultante de ses actions.
*Ib.*, 4, sa résultante, *lisez* la résultante de ses actions.
92, 10, empêche, *lisez* empêchent.
93, 5, elles sont réduites, *lisez* elle est réduite.
103, 2, en", *lisez* en 60".
116, 35, est la distance, *lisez* a pour diamètre la distance.
127, 16, du fond ; il faut, *lisez* du fond, il faut.
133, 6, *après* d'établir, *à la virgule substituez un point.*
143, 34, de le démontrer, *lisez* de la démontrer.
147, 4, pressés, *lisez* pressées.
149, 15, tout, *lisez* toute.
154, 26, puisse pénétrer, *lisez* ne pénètre.
155, 3, *supprimez* les plus.
157, 26, l'indiquent, *lisez* l'indique.
158, 28, de centimère, *lisez* de centimètre.
164, 16, 3539, *lisez* 3532.
173, 31, les réduisent, *lisez* le réduisent.
*Ib.*, 34, et celui, *lisez* et celle.
182, 35, supérieures et inférieures, *lisez* supérieure et inférieure.
183, 26, un fluide, *lisez* un liquide.
190, 15, 89$^{k}$, 760, *lisez* 89$^{k}$, 376.
191, *au titre*, Chapitre VIII, *lisez* Chapitre VII.
216, 15, 62$^{po}$, *lisez* 60$^{po}$.
*Ib.*, *ib.*, 24$^{po}$, *lisez* 23$^{po}$.
223, 15, première, *lisez* la première.
232, 5, rayon, *lisez* diamètre.
235, 24, de l'année dernière, *lisez* 1826.
*Ib.*, 32, ce s'échapper, *lisez* de s'échapper.
236, porte à tort le numéro 26.
*Ib.*, 11, *après* de dehors en dedans, *au point et virgule substituez une virgule.*
238, 14, inogarniques, *lisez* inorganiques.
*Ib.*, 19, simultaméte, *lisez* simultanéité.
239, 28, refrodit, *lisez* refroidit.
242, 11, la calorique, *lisez* le calorique.

Page 243, lig. 1, vaporsiation, *lisez* vaporisation.
244, 19, de calorique, *lisez* du calorique.
246, 12, à une chaleur sans doute plus grande, *lisez* à une température sans doute plus haute.
255, 11, $1+t^{t}\,l$, *lisez* $1+t'\,l$.
256, 1 et 3, Vt, *lisez* $V_t$.
*Ib.*, 12, 14, 15 et 16, V't, *lisez* $V_t'$.
267 14, cobique, *lisez* cubique.
268 16, n'est autre chose, *lisez* n'est approximativement.
269, 24, des mêmes, *lisez* de même.
277, 1, *après* des dilatations, *ajoutez* linéaires.
291, 23, acide nitreux, 1,5500, *lisez* acide nitrique, 1,5115.
*Ib.*, 25, acide nitrique, 1,2175, *lisez* acide nitreux, 1,4510.
*Ib.*, 27, bitume liquide de naphte, *lisez* bitume liquide dit naphte.
292, 4, ajuste la partie, *lisez* ajuste à la partie.
294, 20. *supprimez* tantôt.
295, 19, $\frac{1,32}{0,34}$, *lisez* $\frac{1,2}{0,34}$.
297, *au titre* Chapitre VII, *lisez* Chapitre VI.
*Ib.*, 14, lassellaire, *lisez* lamellaire.
*Ib.*, 35, Pouille, *lisez* houille.
297, 38, gélénium, *lisez* sélénium.
306, 16, du carmin, *lisez* de l'orseille.
308, 26, themomètre, *lisez* thermomètre.
317, 26, le verre tantôt, on observe, *lisez* le verre, tantôt on observe.
320, 18, de glaces, *lisez* de glace.
321, 12, un etat, *lisez* un effet.
326, 3, *supprimez* et.
327, 9, et q'insi, *lisez* et qu'ainsi.
330, 32, entre deux, *lisez* entre les deux.
331, 34, du mercure, *lisez* de mercure.
339, 34, qui ne surpasse, *lisez* que ne surpasse.
346, 6, comme des premières, *lisez* comme de premières.
347, 3, chimériquement, *lisez* chimiquement.
349, 22, bases, *lisez* basses.
358, 31, serait $\frac{1}{10000}$, *lisez* serait $\frac{1}{20000}$.
360, 16, ballons verre, *lisez* ballons de verre.
*Ib.*, 28, 109°, *lisez* 106°, 9.
363, 3, 37, 8, *lisez* 35, 6.
*Ib.*, 5, 79,7, *lisez* 78,4.
385, 33, appartemement, *lisez* appartement.
389, 29, l'enciente, *lisez* l'enceinte.
390, 24, K a $\theta$, *lisez* K a $^{\theta}$.
*Id.*, 27, m a $\theta$, *lisez* m a $^{\theta}$.
398, 27, $\frac{x}{x'}\frac{M(\theta-t)}{M'(t-\theta)}$, *lisez* $\frac{x}{x'}=\frac{M(\theta-t)}{M'(t'-\theta)}$.
404, 12, 4 ou 5 millimètres, *lisez* 5 ou 6 millimètres.
407, 31, 760°, *lisez* 760 mm.
415, 32 *du tableau*, Cat-huant, *lisez* Chat-huant.
426, 9, (271), *lisez* (272).
*Ib.*, 14, *après* capacités *supprimez la virgule*.
429, 9, mois, *lisez* moins.
430, 4, tout, *lisez* tous.




Gravé par Dureau.


Fig. 29.
Fig. 30.
Fig. 31.
Fig. 32.
Fig. 33.
Fig. 34.
Fig. 35.
Fig. 36.
Fig. 37.
Fig. 38.
Fig. 39.
Fig. 40.
Fig. 41.
Fig. 42.
Fig. 43.
Fig. 44.
Fig. 45.
Fig. 46.
Fig. 47.
Fig. 48.



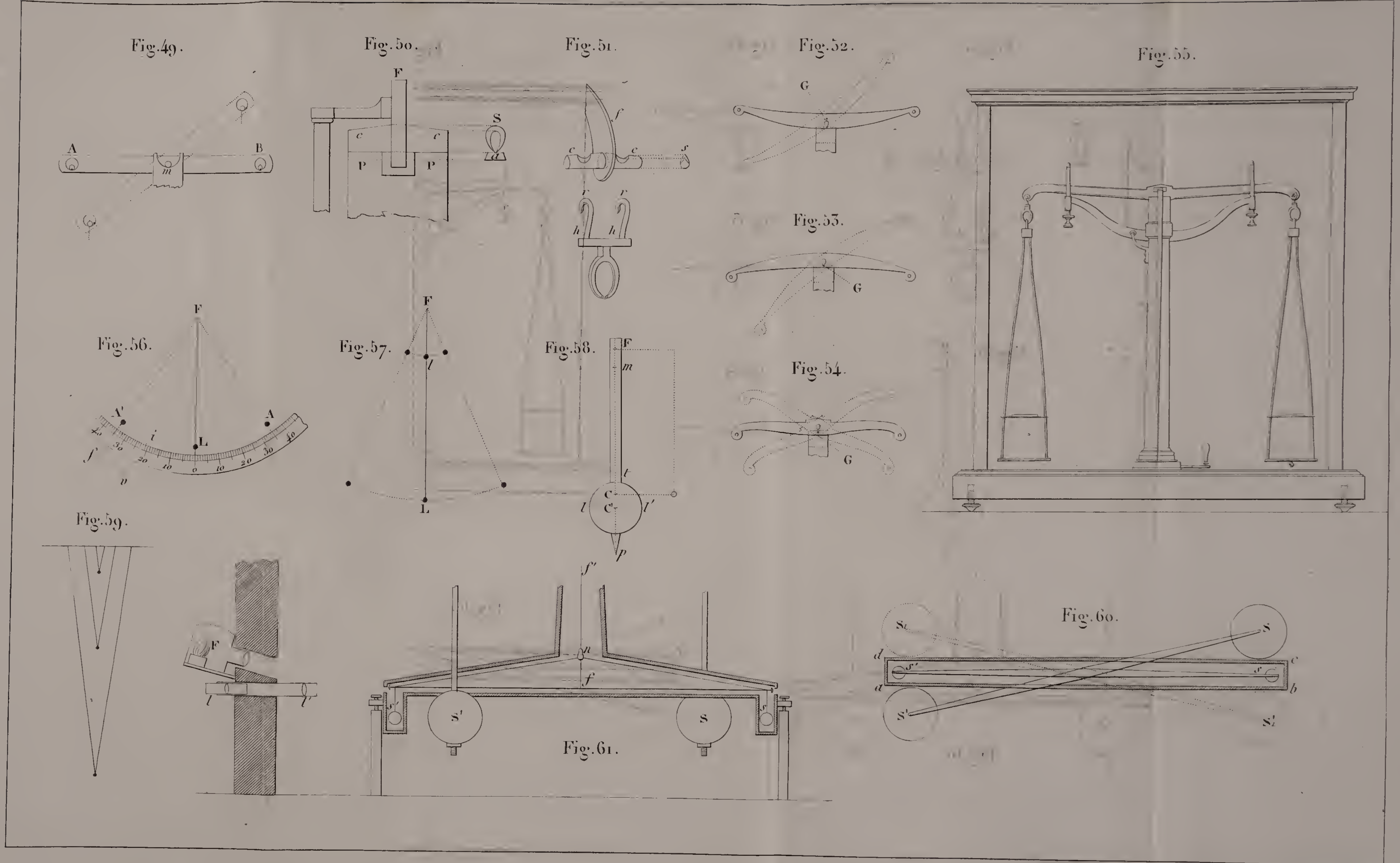
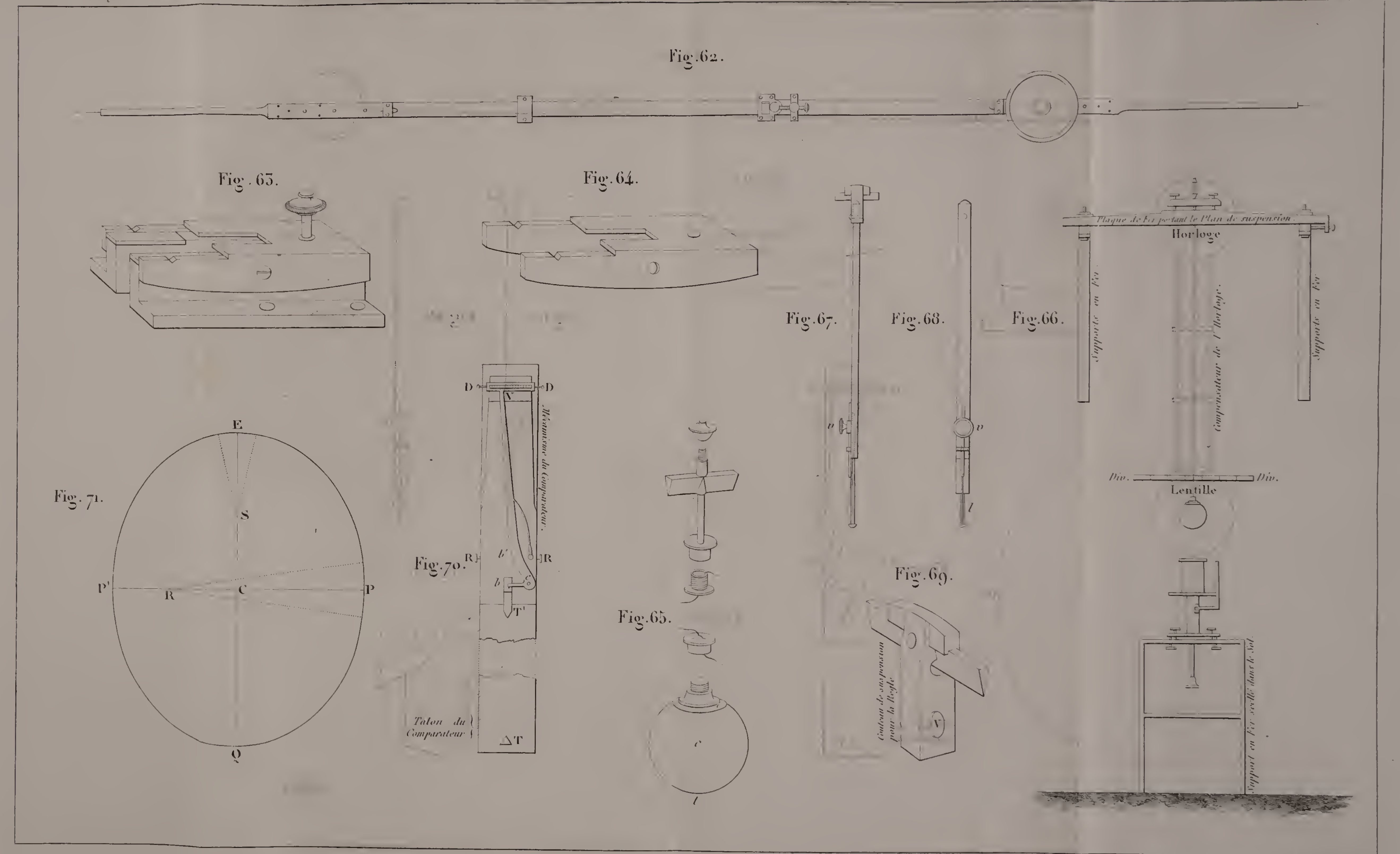
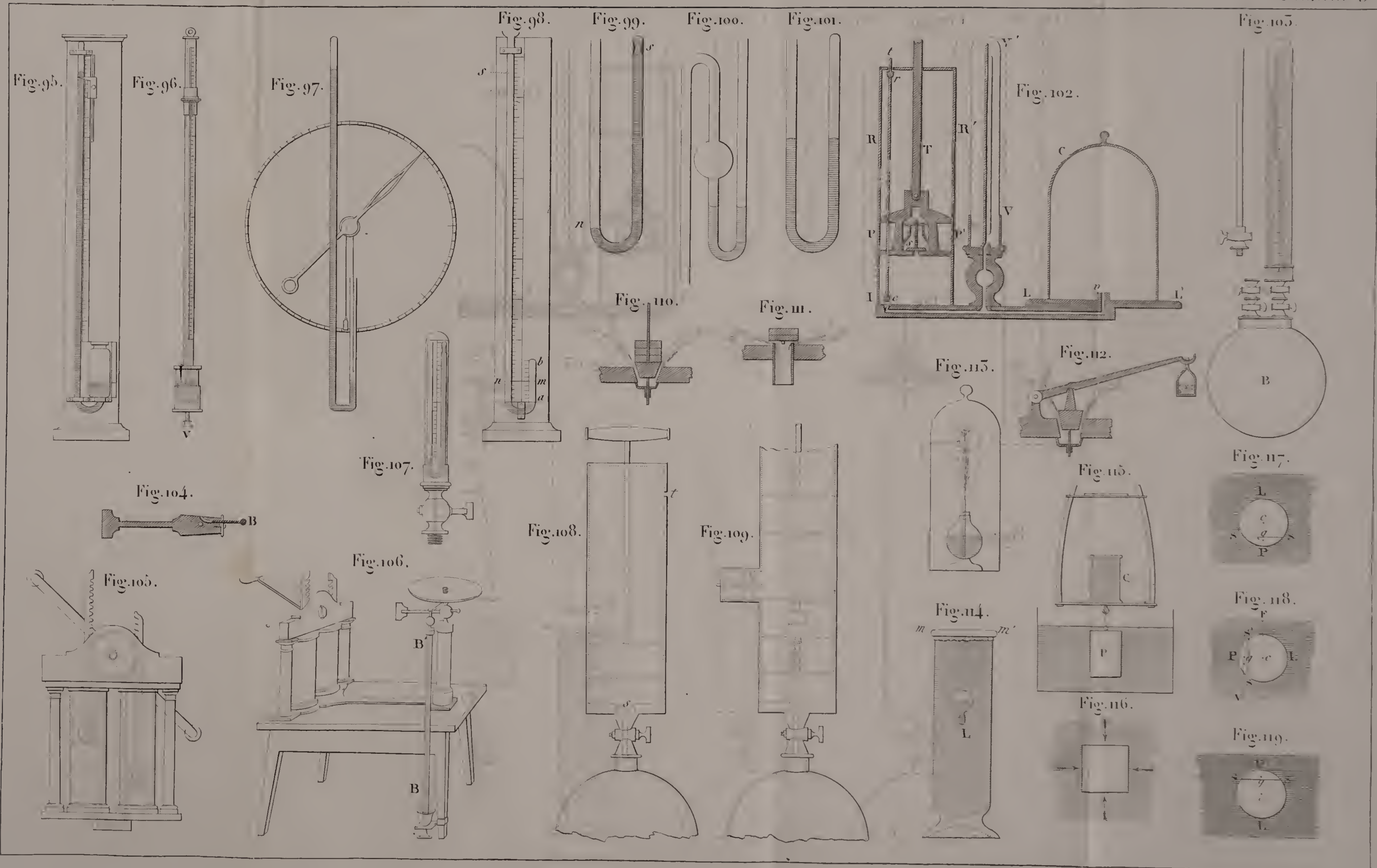
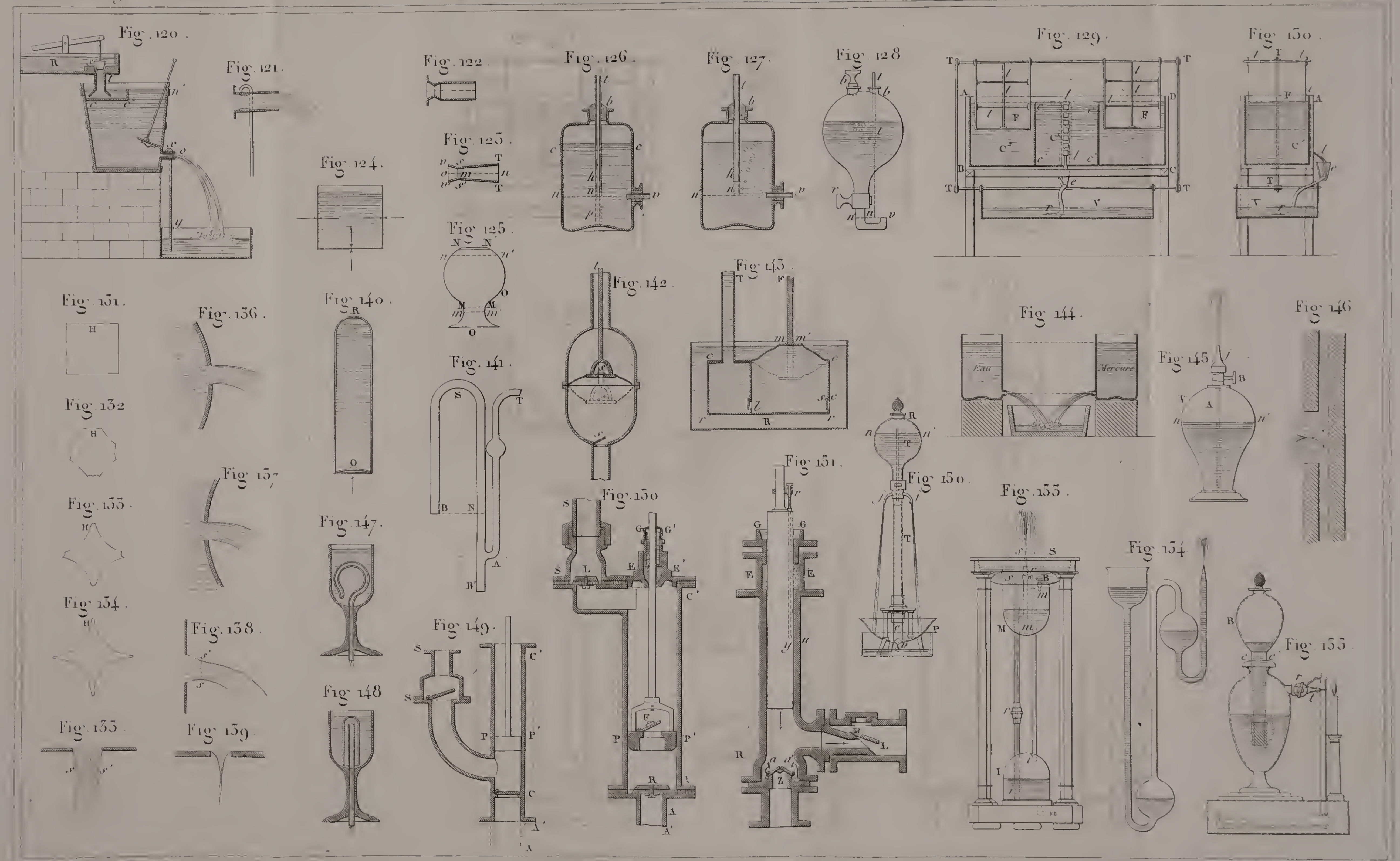


Fig. 49.
A
B
m
Fig. 50.
F
c
c
P
P
S
a
Fig. 51.
f
c
c
s
r
r
h
h
Fig. 52.
G
Fig. 53.
G
Fig. 54.
G
Fig. 55.
Fig. 56.
F
A'
A
L
i
f
v
40
30
20
10
0
10
20
30
40
Fig. 57.
F
l
L
Fig. 58.
F
m
t
C
C'
l
l'
p
Fig. 59.
F
l
l'
f'
n
f
s'
S'
S
s
Fig. 61.
Fig. 60.
S
S
d
c
s'
s
a
b
S'
S'

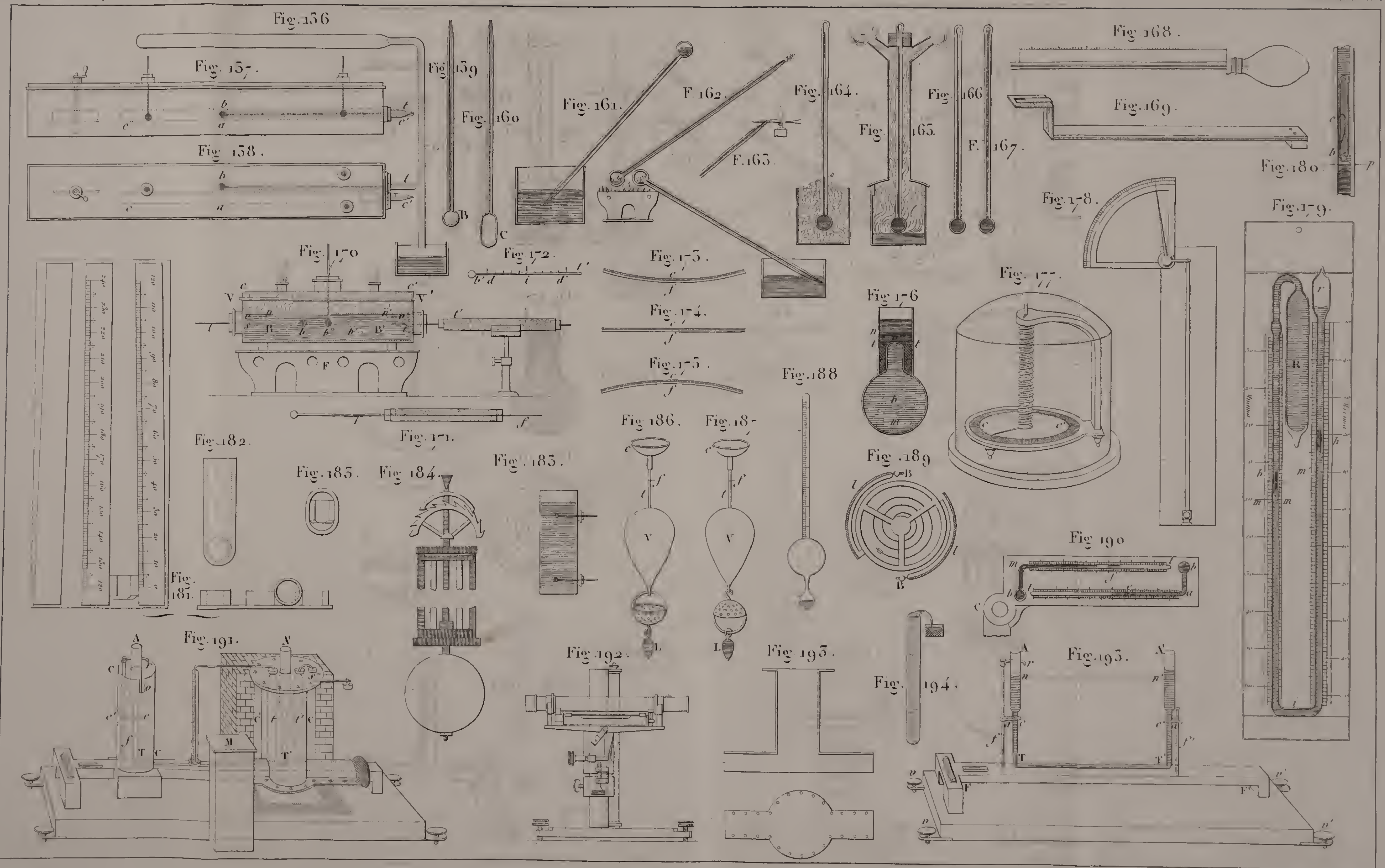

Fig. 62.
Fig. 63.
Fig. 64.
Fig. 67.
Fig. 68.
Fig. 66.
Plaque de Fer portant le Plan de suspension.
Horloge
Supports en Fer
Compensateur de l'Horloge.
Supports en Fer
Div.
Div.
Lentille
Fig. 71.
E
S
P'
R
C
P
Q
Fig. 70.
D
D
V
Mécanisme du Comparateur.
R
R
b'
b
T'
Talon du Comparateur
ΔT
Fig. 65.
Fig. 69.
Couteau de suspension pour la Règle
V
Support en Fer scellé dans le Sol.

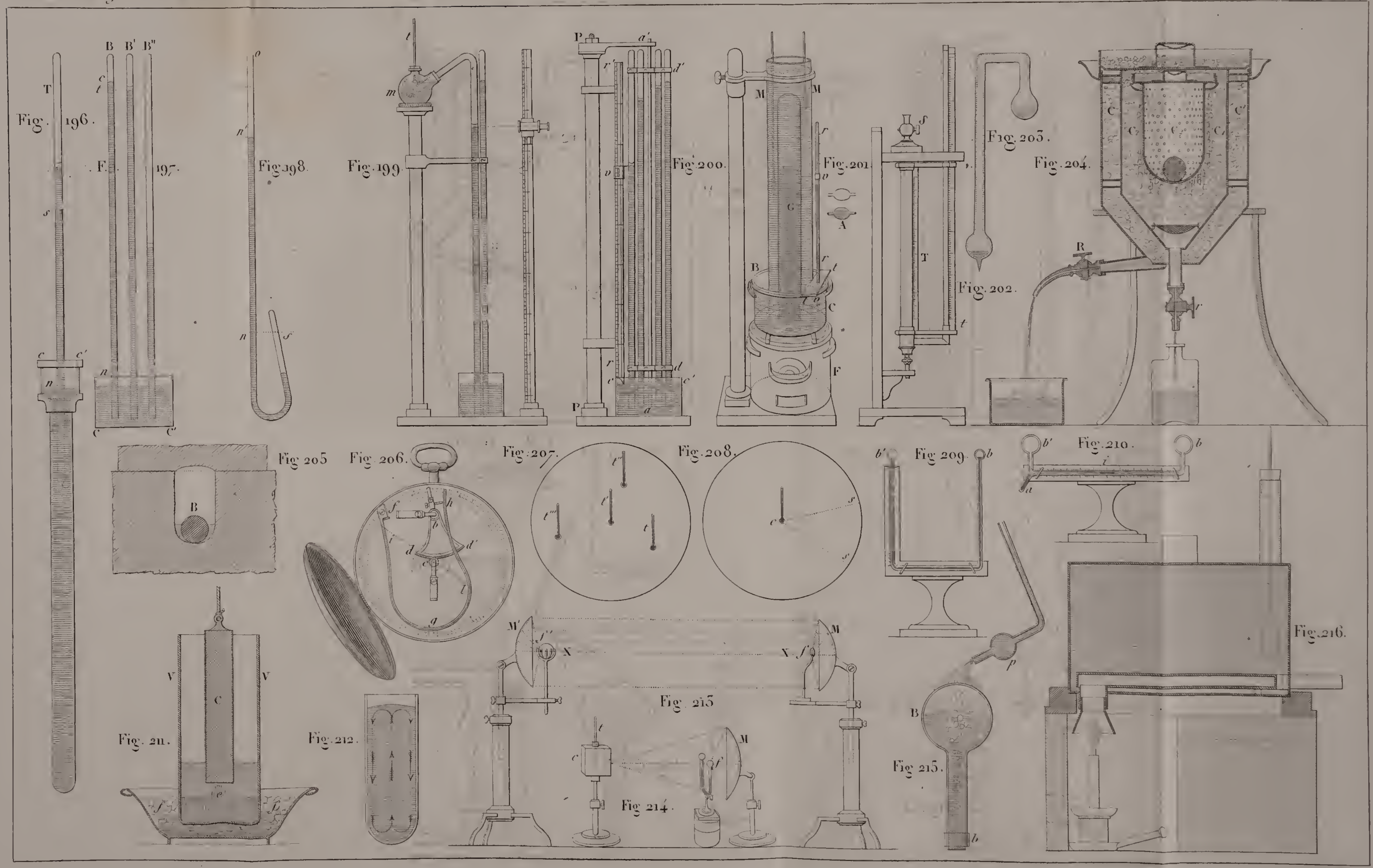



Gravé par Duran



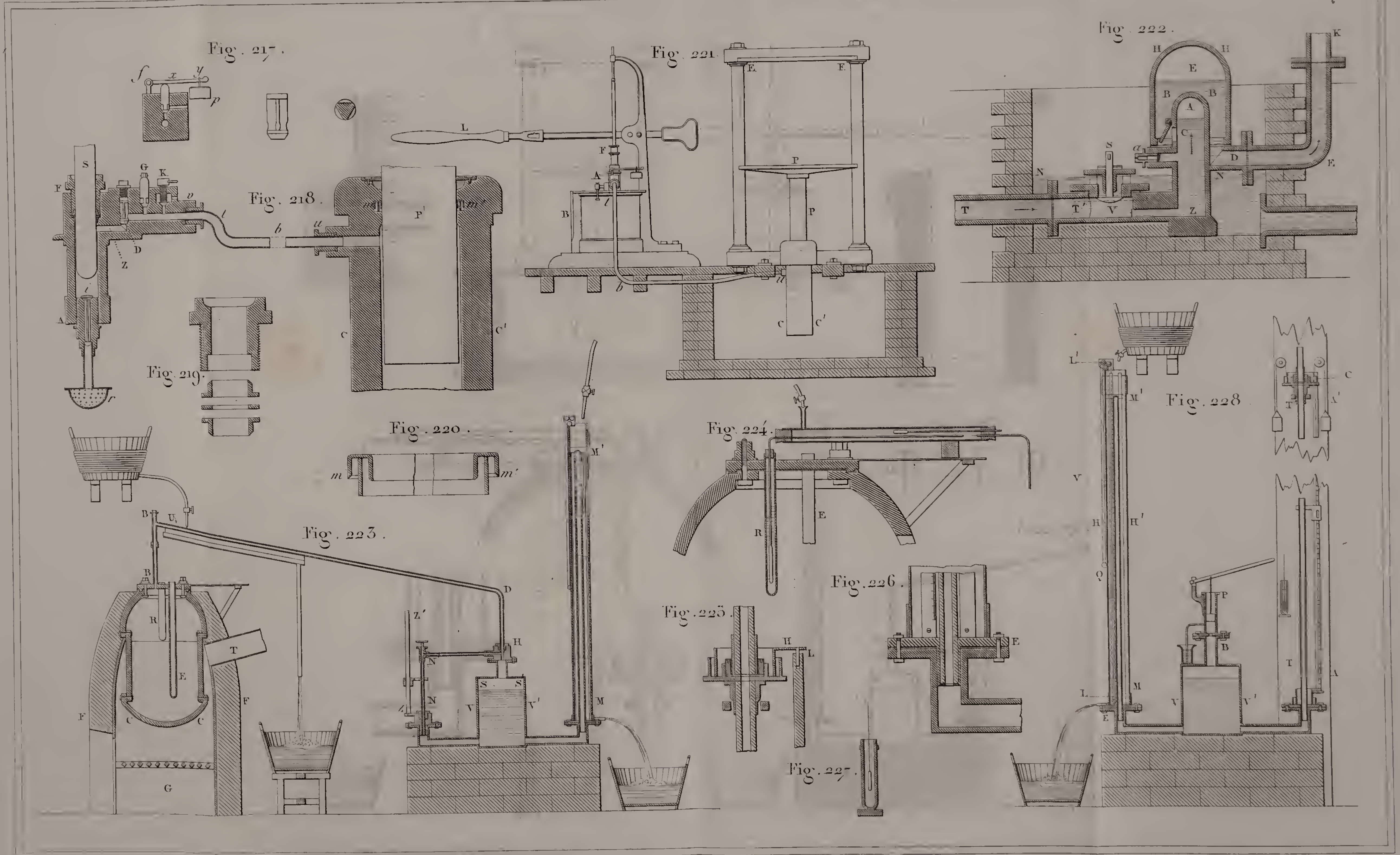

Gravé par Le Blanc.


Fig. 136
Fig. 137
Fig. 138
Fig. 159
Fig. 160
Fig. 161
F. 162
F. 163
Fig. 164
Fig. 165
Fig. 166
F. 167
Fig. 168
Fig. 169
Fig. 180
Fig. 178
Fig. 179
Fig. 170
Fig. 172
Fig. 173
Fig. 174
Fig. 175
Fig. 176
Fig. 177
Fig. 188
Fig. 182
Fig. 183
Fig. 184
Fig. 185
Fig. 171
Fig. 186
Fig. 187
Fig. 189
Fig. 190
Fig. 181
Fig. 191
Fig. 192
Fig. 193
Fig. 194
Fig. 195

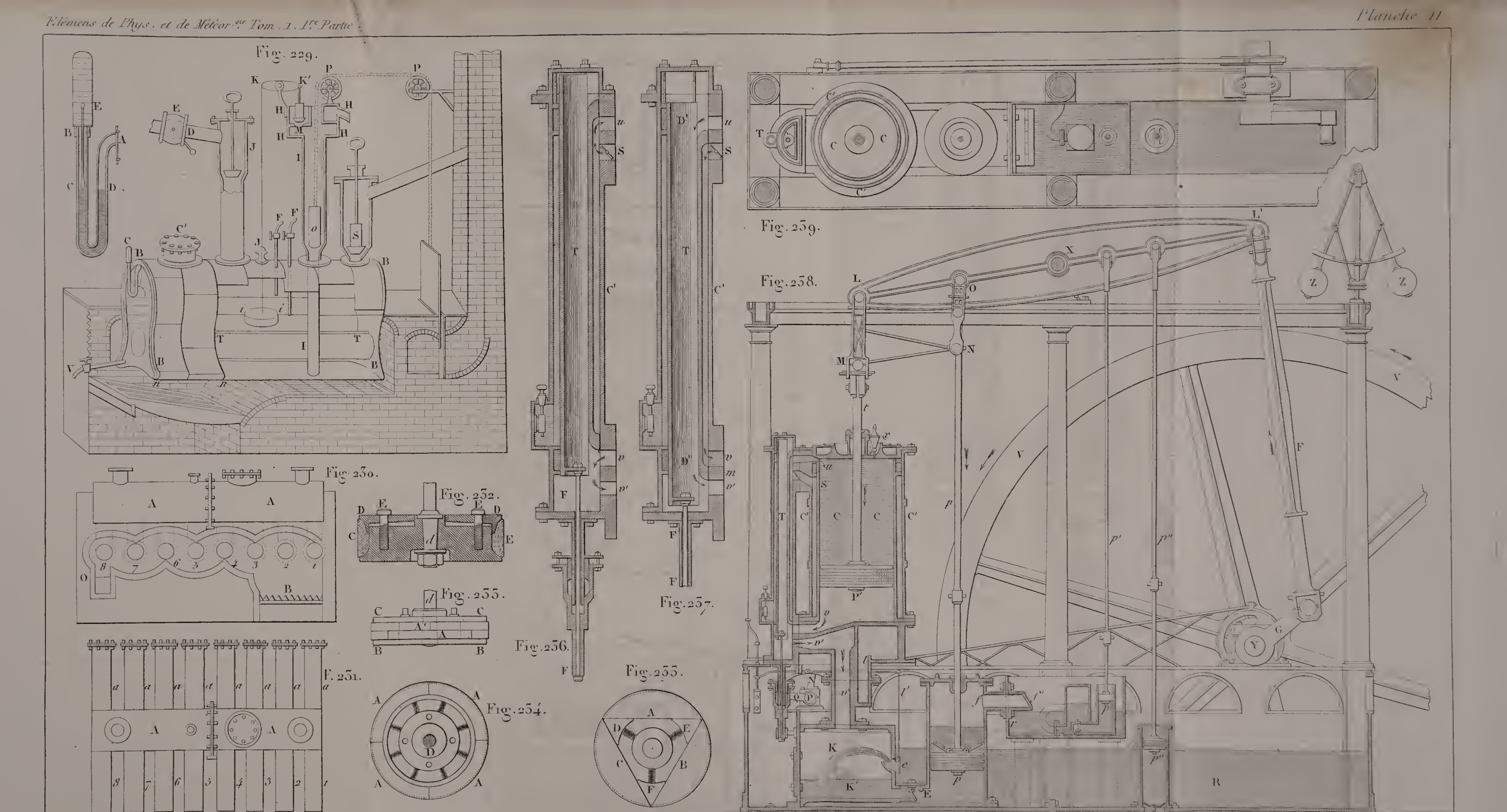



Gravé par Durau






Gravé par Le Blanc.




Gravé par Durau

